



Contribution à la modélisation des caractéristiques photométriques des matériaux de génie civil pour les calculs d'éclairage

Tristan Rondeau

► To cite this version:

Tristan Rondeau. Contribution à la modélisation des caractéristiques photométriques des matériaux de génie civil pour les calculs d'éclairage. Optique / photonique. Conservatoire National des Arts et Métiers, 1999. Français. NNT: . tel-01306784

HAL Id: tel-01306784

<https://hal.science/tel-01306784>

Submitted on 25 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Conservatoire National
des Arts et Métiers

Laboratoire Central des
Ponts et Chaussées



Thèse

Présentée par Tristan RONDEAU

Pour obtenir le titre de
Docteur
du Conservatoire National des Arts et Métiers

Spécialité Métrologie

***Contribution à la modélisation
des caractéristiques photométriques
des matériaux de génie civil
pour les calculs d'éclairage***

Soutenue à Paris, le 30 septembre 1999

N° d'ordre :

Directeur de thèse :
M. F. Lepoutre

JURY :
M. Y. Surrel, Président

M. J.J. Embrechts, Rapporteur

M. B. Péroche, Rapporteur

M. J. Bastie
M. B. Duval

Mlle C. Brusque

« Il n'y a pas une méthode unique
pour étudier les choses »

Aristote

Remerciements

Au cours de ces trois années de thèse, de nombreuses personnes d'horizons très différents m'ont apporté leur soutien et leur aide. De peur d'oublier quelqu'un, je ne citerai aucun nom. Ainsi, je ne me ferai pas d'ennemis...

Tout d'abord, je tiens particulièrement à remercier l'ensemble de la division Exploitation, Signalisation, Éclairage du LCPC. J'ai été chaleureusement accueilli le mardi 1^{er} octobre 1996 pour n'être relâché que le 30 septembre 1999. Évidemment je plaisante, car la bonne ambiance (agrémentée de quelques barbecues) qui règne au sein de cette équipe me faisait oublier les moments les plus difficiles.

J'en viens donc tout naturellement à ces moments difficiles qu'étaient les comités de suivi. Ce système instauré par le LCPC a eu le désavantage d'augmenter périodiquement mon stress (environ tous les six mois), et le gros avantage de me forcer à écrire. Ceci a finalement rendu la rédaction de ce manuscrit beaucoup plus facile. Les conseils et les remarques des membres de ces comités m'ont permis d'orienter mon travail et d'améliorer le contenu et le style de cette thèse. Je remercie donc ces personnes qui ont eu beaucoup de courage et de patience pour me lire et me corriger.

Enfin, le grand jour est arrivé! Dans la salle il y a beaucoup de monde. Gloups! Mais, le calme revient et je commence mon exposé. Les premiers mots ont du mal à sortir, mais au fur et à mesure ma langue se délie. Au premier rang se trouve les membres du jury, dont certains sont venus de loin pour assister à cette soutenance. Je remercie ces personnes qui m'ont écouté attentivement et qui ont su juger de l'intérêt et de la pertinence de mon travail.

Table des matières

Table des matières	9
Liste des figures	15
Liste des tableaux	19
Introduction	21
CHAPITRE 1	
Caractérisation de la réflexion de la lumière	25
1.1 Définitions des grandeurs radiométriques et photométriques	26
1.1.1 Les grandeurs et unités radiométriques	26
1.1.1.1 Le flux	26
1.1.1.2 L'intensité	26
1.1.1.3 L'éclairement	26
1.1.1.4 La luminance	27
1.1.2 Les grandeurs et unités photométriques	27
1.1.2.1 L'observateur de référence de la CIE	27
1.1.2.2 Les unités de la photométrie	29
1.2 La réflexion de la lumière	30
1.2.1 Les propriétés de réflexion des matériaux	30
1.2.1.1 La réflexion spéculaire	30
1.2.1.2 La rétro réflexion	32
1.2.1.3 La réflexion diffuse ou de Lambert	32
1.2.1.4 La réflexion quelconque	33
1.2.2 Caractérisation de la réflexion	33
1.2.2.1 L'indicatrice de diffusion	33
1.2.2.2 Le facteur de réflexion	34
1.2.2.3 Le coefficient de luminance	34
1.2.2.4 Le facteur de luminance	35
1.3 Cas des surfaces routières : les recommandations de la CIE	36
1.3.1 Mesure du coefficient de luminance	36
1.3.2 Les paramètres descriptif Q_0 et S_1	39

1.3.3 Classification des surfaces routières et définition de revêtements types . .	40
1.3.3.1 La classification utilisée en France	40
1.3.3.2 Autres classifications utilisées en Europe	41
1.3.3.3 Prise en compte des caractéristiques photométriques lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage	43

CHAPITRE 2

Réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses 45

2.1 Un critère de rugosité	46
2.2 Décomposition de la lumière réfléchie par une surface	47
2.3 Modèles physiques pour la réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses . .	49
2.3.1 Aperçu des connaissances actuelles	49
2.3.2 Intégrale de Helmholtz	51
2.3.3 Modèle de l'approximation de Kirchhoff	53
2.3.3.1 Approximation de Kirchhoff ou du plan tangent	53
2.3.3.2 Application à une surface rugueuse quelconque	55
a. Description de la surface	55
b. L'intensité cohérente	56
c. L'intensité incohérente	57
2.3.3.3 Application à une «surface à profil gaussien»	57
a. Description de la surface	58
b. Les intensités cohérentes et incohérentes	58
c. Remarques	59
2.3.3.4 Domaine de validité du modèle de Kirchhoff	60
2.3.4 Les effets de «masquage / ombrage»	61
2.3.4.1 Description du phénomène	61
2.3.4.2 Le coefficient de masquage	63
2.3.4.3 Comparaison entre les modèles de masquage et les modèles de «masquage / ombrage»	64
2.3.5 Le modèle complet de réflexion	69
2.3.6 Application du modèle de Kirchhoff aux surfaces routières	72

CHAPITRE 3

Vers un autre modèle numérique 75

3.1 Le goniophotomètre du laboratoire	76
3.2 Le «goniophotomètre virtuel»	78

3.2.1 Principe général	78
3.2.2 Fonctionnement du «goniophotomètre virtuel»	80
3.2.2.1 Le tracé de rayons	80
3.2.2.2 L'algorithme du suivi des rayons	81
3.2.3 La source de lumière	84
3.2.4 La surface étudiée	87
3.2.4.1 Représentation géométrique de la surface	87
a. Utilisation de triangles	87
b. Utilisation de quadriques	87
c. Remarque sur la continuité de la surface	88
d. Calcul du point d'intersection d'un rayon avec une quadrique	88
3.2.4.2 Modélisation de la réflexion de la lumière	89
a. Absence de microtexture	89
b. Présence d'une microtexture	90
3.2.5 Le récepteur	90
3.2.5.1 Description du récepteur	90
3.2.5.2 Calcul du coefficient de luminance	91
3.2.5.3 Utilisation de la symétrie du coefficient de luminance	92
3.3 Validation de la méthode	93
3.3.1 Influence du nombre de rayons lancés	93
3.3.1.1 La méthode utilisée	93
3.3.1.2 Cas d'une surface plane	94
3.3.1.3 Cas d'une surface rugueuse	95
3.3.2 Comparaison entre les simulations et les modèles théoriques	99
3.4 Conclusion	103

CHAPITRE 4

Application du goniophotomètre virtuel aux surfaces synthétiques

105

4.1 Étude des réflexions multiples	106
4.1.1 Cas où le matériau est spéculaire	106
4.1.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant	112
4.2 Étude des effets de «masquage / ombrage»	117
4.2.1 Méthode de calcul	117
4.2.2 Validation de la méthode	119

4.2.2.1 Calcul du coefficient de masquage S	119
a. Surface à profil en triangle	119
b. Surface à profil sinusoïdal	121
c. Surfaces à profil gaussien	123
4.2.2.2 Calcul du coefficient de «masquage / ombrage» C	126
4.2.3 Étude du coefficient de «masquage / ombrage» C	129
4.2.3.1 Cas où les plans d'éclairage et d'observation sont confondus ...	129
4.2.3.2 Cas des autres plans d'observation	132
4.2.4 Conclusion	135
4.3 Influence des propriétés photométriques du matériau de la surface	136

CHAPITRE 5

Application du goniophotomètre virtuel aux revêtements de chaussées

143

5.1 Présentation des revêtements de chaussée	144
5.1.1 Qu'est-ce qu'un revêtement de chaussée?	144
5.1.1.1 Les constituants d'un revêtement	144
a. Les granulats	144
b. Les liants	145
5.1.1.2 Les enrobés	145
5.1.1.3 Les enduits	146
5.1.2 Caractéristiques des revêtements mesurés	147
5.2 Mesure des profils de surfaces	150
5.2.1 Principe de la mesure	150
5.2.2 Limitations de la mesure	152
5.2.3 Corrections apportées aux mesures	154
5.3 Études des profils mesurés	155
5.3.1 Remarques préliminaires	155
5.3.1.1 Les paramètres des mesures	155
5.3.1.2 Problème de la représentativité des mesures	156
5.3.2 Paramètres caractéristiques des surfaces	157
5.3.2.1 Paramètres d'amplitude des surfaces	157
5.3.2.2 Analyse de la distribution des hauteurs	160
5.3.2.3 Propriétés spatiales des surfaces	166

5.3.3 Conclusion	168
5.4 Utilisation des profils mesurés	170
5.4.1 Étude des réflexions multiples	170
5.4.1.1 Cas où le matériau est spéculaire	170
5.4.1.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant	171
5.4.1.3 Conclusion	173
5.4.2 Étude des effets de «masquage / ombrage»	174
5.4.2.1 Le coefficient de masquage S	174
5.4.2.2 Le coefficient de «masquage / ombrage» C	177
a. Cas où les plans d'éclairage et d'observation sont confondus	177
b. Cas des autres plans d'observation	182
5.4.2.3 Conclusion	185
5.4.3 Étude du coefficient de luminance	186
5.4.3.1 Cas où le matériau est spéculaire	186
5.4.3.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant	188
5.4.3.3 Pour aller plus loin	190
Conclusion	193
Annexes	197
A.1 Génération des «surfaces à profils gaussiens»	198
A.2 Calcul de l'angle solide des capteurs	201
A.3 Calcul du plan de référence	204
Bibliographie	207
Index	211

Liste des figures

Figure 1.1 Les domaines de la vision.	28
Figure 1.2 Efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ (d'après [CIE 87]).	28
Figure 1.3 Facteur de Fresnel $F(\theta, n)$ pour différents indices de réfraction n	32
Figure 1.4 Définition des angles d'éclairage et d'observation.	36
Figure 1.5 Portion de chaussée vue sous un angle α de 1°	38
Figure 1.6 Visualisation des limites d'intégration pour le calcul de Q_0 et des directions d'éclairage pour le calcul de S_1	40
Figure 2.1 Variations du critère de Rayleigh R_a en fonction de l'angle θ et de l'écart-type σ des hauteurs de la surface rugueuse ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$).	47
Figure 2.2 Décomposition de la lumière réfléchie par la surface rugueuse d'un matériau hétérogène.	48
Figure 2.3 Réflexion d'une onde électromagnétique plane E_i sur une surface rugueuse S_{ref} [EMB 94].	53
Figure 2.4 Approximation du plan tangent.	54
Figure 2.5 Représentation des phénomènes de «masquage / ombrage».	61
Figure 2.6 Coefficient de masquage S en fonction de l'angle θ et de la rugosité r	66
Figure 2.7 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction de l'angle d'observation θ_r , de l'angle d'incidence θ_i et de la rugosité r	68
Figure 2.8 Modèle de Kirchhoff en fonction de l'angle d'éclairage θ_i et de la rugosité r de la surface.	71
Figure 3.1 Schéma de fonctionnement du goniophotomètre du LCPC.	76
Figure 3.2 Différence entre la surface éclairée et la surface vue en fonction de l'angle d'observation β	77
Figure 3.3 Représentation schématique du goniophotomètre virtuel.	79
Figure 3.4 Comportements d'un rayon primaire.	80
Figure 3.5 Définition de la boîte englobante de la surface et des points d'entrée et de sortie des rayons primaires et secondaires.	82
Figure 3.6 Suivi du rayon projeté sur la grille régulière.	83
Figure 3.7 Éclairage de la surface sous un angle d'incidence θ_i	85
Figure 3.8 Différents échantillonnages de la source (échantillonnage d'un carré par 16×16 rayons).	86
Figure 3.9 Intersection entre un rayon et un élément de surface (ici une quadrique).	89
Figure 3.10 Découpage régulier du récepteur.	91

Figure 3.11 Évolution de la moyenne, de l'écart-type et du maximum des écarts relatifs $\Delta q(\theta_r, \phi_r)$ pour différents tirages.	95
Figure 3.12 Évolution des moyenne, écart-type et maximum des écarts relatifs entre les simulations pour différentes incidences θ_i et pour une rugosité $r = 0,1$	97
Figure 3.13 Évolution des moyenne, écart-type et maximum des écarts relatifs entre les simulations pour différentes incidences θ_i et pour une rugosité $r = 0,5$	98
Figure 3.14 Comparaison entre les simulations et le modèle de Kirchhoff pour différents angles d'éclairage θ_i et une de rugosité $r = 0,2$	100
Figure 3.15 Comparaison entre les simulations et le modèle de Kirchhoff pour différents angles d'éclairage θ_i et une de rugosité $r = 0,1$	101
Figure 3.16 Comparaison entre les simulations et le modèle de Kirchhoff pour différents angles d'éclairage θ_i et une de rugosité $r = 0,07$	102
Figure 4.1 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).	107
Figure 4.2 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i	108
Figure 4.3 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau spéculaire et pour $r = 1$	109
Figure 4.4 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau spéculaire et pour $r = 0,5$	110
Figure 4.5 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).	112
Figure 4.6 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i	113
Figure 4.7 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau parfaitement diffusant et pour $r = 1$	114
Figure 4.8 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau parfaitement diffusant et $\theta_i = 0^\circ$	115
Figure 4.9 Représentation des différents angles nécessaires pour le calcul de la longueur BC	120
Figure 4.10 Coefficient de masquage $S(\theta)$ d'un profil en triangle.	121
Figure 4.11 Définition des points d'entrée M et de sortie N de l'ombre pour un profil sinusoïdal. .	121
Figure 4.12 Coefficient de masquage $S(\theta)$ d'un profil sinusoïdal.	123
Figure 4.13 Comparaison entre les valeurs de S calculées avec le goniophotomètre virtuel, le modèle de Smith et les données de Brockelman et Hagfors.	125
Figure 4.14 Profil en triangle utilisé.	126
Figure 4.15 Calcul du coefficient de «masquage / ombrage» C pour $\phi_r = 0^\circ$	127
Figure 4.16 Fonction de «masquage / ombrage» $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r)$ pour un profil de surface en triangle et pour trois directions d'observation ϕ_r	128

Figure 4.17 Comparaison entre les valeurs simulées de C et le modèle de Smith, dans le plan d'éclairage et pour une rugosité r de 1 et 0,5.	130
Figure 4.18 Comparaison entre les valeurs simulées de C et le modèle de Smith, dans le plan d'éclairage et pour une rugosité r de 0,25 et 0,1.	131
Figure 4.19 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) et de la rugosité r de la surface.	133
Figure 4.20 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) et de la rugosité r de la surface.	134
Figure 4.21 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 1$	137
Figure 4.22 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,5$	138
Figure 4.23 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,25$	139
Figure 4.24 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,1$	140
Figure 5.1 Images des différents types de revêtements mesurés.	149
Figure 5.2 Schéma de fonctionnement du détecteur d'altitude de TRIDIM.	151
Figure 5.3 Principe de la mesure par triangulation : relation entre la hauteur mesurée et le déplacement observé par le photodétecteur.	151
Figure 5.4 Cas d'une mauvaise mesure de l'altitude dans les méthodes de triangulation.	153
Figure 5.5 Comparaison des histogrammes pour deux échantillons de même type.	156
Figure 5.6 Coupes de quelques profils de revêtements de chaussée.	159
Figure 5.7 Histogrammes des hauteurs des principaux types de revêtements présents sur le territoire français.	161
Figure 5.8 Histogrammes des hauteurs des profils mesurés après décalage du plan de référence. .	163
Figure 5.9 Recherche des paramètres des lois de distribution du type log-normal.	164
Figure 5.10 Recherche des paramètres des deux lois normales pour l'ES.	165
Figure 5.11 Fonctions d'autocorrélation $B(\tau)$ de différents revêtements.	167
Figure 5.12 Rugosité et surface développée des revêtements de chaussée et des «surfaces à profil gaussien».	169
Figure 5.13 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).	170
Figure 5.14 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).	171
Figure 5.15 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).	172
Figure 5.16 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).	172
Figure 5.17 Coefficient de masquage S en fonction du type de revêtement.	174

Figure 5.18 Valeurs du coefficient de masquage S suivant la direction d'observation ϕ_r considérée.	175
Figure 5.19 Répartition des normales des facettes de différentes surfaces.	176
Figure 5.20 Distributions des angles ϕ_n pour différentes surfaces.	177
Figure 5.21 Coefficient de «masquage / ombrage» C dans le plan d'éclairage en fonction du type de revêtement.	178
Figure 5.22 Évolution de l'ombre portée en fonction de l'angle d'éclairage θ_i	179
Figure 5.23 Comparaison entre le coefficient de «masquage / ombrage» C d'un revêtement et d'une «surface à profil gaussien».	181
Figure 5.24 Coefficient de «masquage / ombrage» C pour le BBDr et le BBSG en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r)	183
Figure 5.25 Comparaison du coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction de l'angle d'isotropie δ	184
Figure 5.26 Coefficient de luminance q de différents types de revêtement (matériau spéculaire). .	187
Figure 5.27 Coefficient de luminance q de différents types de revêtement (matériau diffusant). .	189
Figure 5.28 Coefficient de luminance q mesuré pour un BBDr (à 20% de vide).	191
Figure A.1.1 Distribution des hauteurs et fonction d'autocorrélation pour une «surface à profil gaussien» : $\sigma = 1$ et $T = 1$	200
Figure A.1.2 Image d'une «surface à profil gaussien».	200
Figure A.2.1 Facteur de forme entre deux éléments de surface dS_1 et dS_2	201
Figure A.2.2 Calcul du facteur de forme entre le polygone S défini par les points P_i et le point x de l'élément de surface dx de normale \mathbf{n}	202
Figure A.2.3 Principe de l'«analogie de Nusselt».	203

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Définition du système de classification R.	41
Tableau 1.4 : Comparaison des limites des classes pour les 3 systèmes de classification de la CIE.	42
Tableau 1.2 : Définition du système de classification N.	42
Tableau 1.3 : Définition du système de classification C.	42
Tableau 3.1 : Nombre de rayons lancés pour les 6 simulations testées.	93
Tableau 4.1 : Rapports entre les facteurs de réflexion suivant l'ordre de réflexion.	111
Tableau 4.2 : Rapports entre les facteurs de réflexion suivant l'ordre de réflexion.	115
Tableau 4.3 : Variations en fonction de ρ des écarts relatifs entre ρ , ρ^2 et ρ^3	116
Tableau 4.4 : Caractéristiques des profils gaussiens utilisés	123
Tableau 4.5 : Angles θ_i utilisés dans les figures 4.17 et 4.18.	129
Tableau 4.6 : Récapitulatif des différents angles θ_i et θ_r utilisés pour les figures 4.19 et 4.20. ...	132
Tableau 5.1 : Composition des BBDr et du BBTM.	148
Tableau 5.2 : Composition du BBM, du BBSG et des ES.	148
Tableau 5.3 : Paramètres statistiques des profils mesurés.	158
Tableau 5.4 : Paramètres descriptifs des distributions des hauteurs des profils mesurés.	162
Tableau 5.5 : Longueurs de corrélations des profils mesurés.	168

Introduction

Les objectifs de l'éclairage public sont nombreux, l'un des plus importants étant l'amélioration de la sécurité lors des déplacements de nuit. L'automobiliste doit être en mesure de percevoir distinctement les points singuliers de la route et les obstacles éventuels fixes ou mobiles. Une installation d'éclairage doit donc assurer à l'utilisateur une certaine «capacité de perception» et un certain «confort visuel» pour que celui-ci puisse lire rapidement les informations indispensables à sa tâche de conduite [AFE 85].

Un objet se détache visuellement du fond sur lequel il se présente lorsque son contraste en luminance est supérieur à une certaine valeur dite contraste de seuil. La luminance est la grandeur physique qui caractérise l'aspect de «brillance» de l'objet et du fond. Si le fond est plus clair que l'objet, ce dernier va se détacher en «effet silhouette», ce qui correspond à un contraste négatif: c'est la situation qui se produit le plus souvent en éclairage public.

Du point de vue d'un conducteur assis au volant de son véhicule, un obstacle se présente sur un fond clair, qui est principalement constitué par la surface de la chaussée se trouvant devant le véhicule. Il faut donc que la luminance moyenne de la chaussée soit suffisante pour garantir des conditions de visibilité correctes. Cependant, l'utilisateur ne doit pas être gêné par une situation visuelle désagréable qui va l'éblouir ou perturber sa concentration. Le fond vu par l'utilisateur doit donc présenter certaines qualités d'uniformités de luminance.

Toutes ces constatations, qui découlent des principes de fonctionnement du système visuel de l'homme et de nombreuses études sur les performances visuelles des usagers dans des conditions de conduite nocturne, ont conduit à établir des critères de qualité pour une installation d'éclairage. Ces critères portent sur le niveau et les uniformités de la luminance de la chaussée et sur la limitation à l'éblouissement.

Lors du calcul du dimensionnement d'une installation d'éclairage, la luminance de la chaussée est déterminée sur un semis de points. Ainsi, les critères de qualité exigés peuvent

être validés précisément. Or, la luminance en un point de la chaussée est reliée d'une part, à l'éclairement reçu par la surface autour de ce point et d'autre part, aux propriétés photométriques de la chaussée et en particulier à son coefficient de luminance. En effet, c'est ce coefficient de luminance qui décrit la manière dont la surface réfléchit la lumière en donnant sa répartition spatiale. Il est donc primordial de connaître le plus précisément possible le coefficient de luminance de tous les types de revêtements de chaussée présents en France.

Le coefficient de luminance des revêtements de chaussées a été longuement étudié depuis le début des années 1970. Un travail expérimental important a d'ailleurs permis à la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) de publier une série de recommandations sur la mesure (partielle) de ce coefficient de luminance. Par ailleurs, une classification et la définition de revêtements standards ont été réalisées, ce qui a considérablement simplifié le calcul du dimensionnement des installations d'éclairage. Mais, tout ce travail a été réalisé du point de vue de l'automobiliste, c'est-à-dire pour des conditions d'observation de la chaussée très particulières. C'est ainsi que l'angle d'observation est fixé à 1° : il correspond à l'angle sous lequel un automobiliste voit la chaussée se trouvant devant lui et comprise entre 60 et 160 mètres.

Mais aujourd'hui, les rôles de l'éclairage public ont évolué. Il n'est plus conçu uniquement pour les automobilistes et tous les usagers doivent être considérés. La géométrie adoptée par la CIE est alors trop restrictive, car elle ne permet de prendre en compte qu'une portion réduite de la perspective de la chaussée qui représente une petite partie du champ visuel de l'utilisateur (*cf.* figure 1.5). L'évaluation du panorama lumineux complet de l'environnement urbain nécessite donc la connaissance du coefficient de luminance pour toutes les directions d'éclairage et d'observation. En outre, des logiciels de synthèse d'images appliqués aux problèmes de l'éclairage public ont récemment vu le jour. Une des caractéristiques de ces logiciels, comme par exemple *Lise-LCPC*, est de calculer les inter-réflexions entre les différents éléments d'une scène urbaine (la chaussée, les murs des bâtiments ou le mobilier urbain). Ceci permet d'obtenir des images au rendu plus réaliste et pour avoir des résultats physiquement corrects, le coefficient de luminance des matériaux de ces éléments doit être complètement connu. À nouveau, la géométrie définie par la CIE est trop restrictive, car toutes les directions d'éclairage et d'observation doivent être considérées.

C'est à partir de ces besoins que l'objectif de cette thèse a été défini : améliorer les connaissances actuelles sur les caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée. Cependant, le but de ce travail n'est pas de définir une nouvelle classification des réponses photométriques de ces revêtements qui prendrait en compte toutes les directions d'éclairage et d'observation. Ce qui doit être recherché, c'est l'évolution du coefficient de luminance des revêtements de chaussée en fonction des directions d'éclairage et d'observation, mais aussi en fonction des paramètres caractérisant les revêtements, c'est-à-dire leur texture et les propriétés optiques des matériaux qui les constituent.

Pour aboutir à ce résultat, deux démarches sont envisageables. La première est basée sur une approche statistique reposant sur un plan d'expérience. Pour analyser simultanément les différents paramètres des surfaces, ce plan d'expérience nécessite un grand nombre d'échantillons de revêtements qui doivent être fabriqués ou prélevés sur différentes routes. Puis, le coefficient de luminance de tous ces échantillons doit être mesuré à l'aide du goniorélectomètre.

tre du LCPC (*cf.* § 3.1). Ceci semble irréalisable à court terme et une seconde approche, basée sur la modélisation la plus exacte possible des caractéristiques physiques des revêtements, a donc été adoptée.

Avant de développer précisément cette approche, un premier chapitre permet de fournir au lecteur les bases nécessaires à la compréhension des phénomènes de réflexions de la lumière. Toutes les grandeurs physiques utilisées par la suite y sont définies et récapitulées. Ces grandeurs sont celles qui caractérisent d'une part, l'énergie transportée par la lumière et d'autre part, l'énergie réfléchie par une surface. Les différents modes de réflexion de la lumière sont également présentés. Enfin, dans le cas particulier où la surface réfléchissante est un revêtement de chaussée, les recommandations de la CIE sont développées. Ces recommandations sont à ce jour les seules qui évaluent les propriétés photométriques des surfaces routières.

L'objectif fixé est de déterminer le coefficient de luminance des surfaces par une méthode numérique. Le premier travail a donc consisté, par l'intermédiaire d'une recherche bibliographique, à faire un «état de l'art» sur les différentes méthodes qui donnent la répartition spatiale de la lumière réfléchie par une surface rugueuse. Parmi les nombreux modèles existant, le modèle de «l'approximation de Kirchhoff» a été retenu et il est longuement expliqué dans le chapitre 2. En théorie, ce modèle n'est pas le plus performant, mais en pratique, c'est celui qui se prête le mieux à une évaluation des propriétés de réflexion des surfaces à rugosité significative (les autres modèles ayant des formulations très complexes, souvent limitées à une dimension). Cependant, une analyse critique de ses hypothèses montre qu'il n'est pas adapté au cas spécifique des revêtements de chaussée. Il a alors été décidé d'élaborer une autre méthode numérique qui s'affranchit de ces hypothèses contraignantes et qui permet ainsi de calculer les propriétés photométriques de ces surfaces rugueuses.

L'originalité de ce travail provient du fait que, contrairement aux modèles théoriques, le matériau de la surface peut avoir des propriétés photométriques quelconques. De plus, aucune contrainte n'existe sur le profil de la surface de l'échantillon étudié. L'outil informatique, appelé par la suite le «goniophotomètre virtuel», est présenté en détail au chapitre 3. La technique utilisée, basée sur le «tracé de rayons», permet de recréer les conditions d'un éclairage naturel en décomposant le faisceau de lumière en rayons lumineux. Toutefois, pour que cette décomposition reste valable, il est nécessaire que la dimension des facettes de la surface soit très supérieure à la longueur d'onde de la lumière incidente. Les rayons, qui se réfléchissent une ou plusieurs fois sur la surface, sont ensuite récupérés par un récepteur. Finalement, les données enregistrées par ce récepteur permettent le calcul du coefficient de luminance de l'échantillon pour des directions d'éclairage et d'observation préalablement fixées. Après le développement de toutes les hypothèses nécessaires à la modélisation de la source de lumière, de la surface et du récepteur, une validation du «goniophotomètre virtuel» est entreprise pour des «surfaces à profil gaussien». Cette validation, faite dans des conditions particulières, autorise la comparaison des simulations avec les prédictions du modèle de «l'approximation de Kirchhoff». Au vu des résultats obtenus, il semble possible d'étendre l'utilisation du «goniophotomètre virtuel» à toutes les surfaces, en particulier aux revêtements de chaussée.

Les chapitres 4 et 5 développent toutes les possibilités offertes par le «goniophotomètre virtuel» pour analyser précisément les phénomènes de réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses. Dans une première partie (chapitre 4), les surfaces utilisées sont des surfaces synthétiques à «profil gaussien». L'étude de l'importance en proportion et en énergie des

réflexions multiples, ainsi que le calcul du coefficient de «masquage / ombrage»¹ apportent des informations nouvelles. Ces résultats remettent en questions certaines des idées communément admises par les modèles théoriques existant. Ces données devraient permettre dans le futur d'améliorer ces modèles. L'influence des propriétés photométriques du matériau de la surface et de la macrotexture de cette surface sur son coefficient de luminance est également abordée.

Dans la seconde partie (chapitre 5), les études précédentes sont reprises pour des revêtements de chaussée. Ceci suppose donc que des profils de différents types de revêtements ont été mesurés avec précision. Malheureusement, la mesure de ces profils à l'aide de l'appareil TRIDIM du LCPC-Nantes, a rencontré des problèmes métrologiques gênants. Cependant, malgré ces défauts, quelques échantillons de revêtements types ont pu être mesurés. Ceci a permis de vérifier que, statistiquement, il existe de grandes différences entre les profils de ces revêtements, ces différences étant évidemment liées à la macrotexture de ces surfaces et à leur mode de fabrication. Comme pour les surfaces synthétiques, la macrotexture de ces revêtements a une influence sur leur coefficient de luminance, mais aussi sur le comportement des réflexions multiples et sur le coefficient de «masquage / ombrage».

Les premiers résultats obtenus d'une part, pour des «surfaces à profil gaussien» et d'autre part, pour des revêtements de chaussée, donnent une idée des possibilités offertes par le «goniophotomètre virtuel». L'étude de la réflexion de la lumière par une surface rugueuse peut être abordée sous de nouveaux aspects. Le «goniophotomètre virtuel» apporte alors soit des valeurs de comparaison pour des modèles théoriques, soit des valeurs du coefficient de luminance d'une surface de profil particulier pour lequel aucun modèle théorique n'est applicable. De plus, la base du «goniophotomètre virtuel» que constitue l'algorithme de suivi des rayons peut être complété par d'autres fonctions. Ainsi, les nouvelles applications qui seront imaginées par la suite pourront facilement être intégrées.

1. Ce coefficient est défini au chapitre 2.

CHAPITRE 1

Caractérisation de la réflexion de la lumière

Dans une première partie, les grandeurs physiques utilisées par la suite sont présentées. Les définitions et les noms de ces grandeurs sont extraits du «Vocabulaire international de l'éclairage» [CIE 87]. Les définitions des grandeurs énergétiques de base de la radiométrie sont rappelées dans le paragraphe 1.1. Puis, après la définition de l'observateur de référence de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), ces grandeurs sont étendues au domaine de la photométrie.

La seconde partie (§ 1.2) est consacrée aux propriétés de réflexion de la lumière. Les différents modes de réflexion de la lumière par une surface quelconque sont décrits. Puis, les paramètres qui permettent de caractériser d'une manière globale ou plus fine la réflexion de la lumière sont définis.

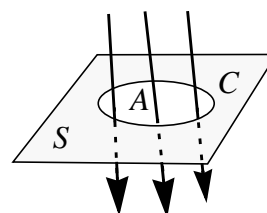
Enfin dans la dernière partie (§ 1.3), la méthode proposée par la CIE pour décrire les caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée est exposée. Il faut noter qu'à l'exception des travaux de la CIE, les propriétés photométriques des revêtements des chaussées ont été rarement étudiées.

1.1 Définitions des grandeurs radiométriques et photométriques

1.1.1 Les grandeurs et unités radiométriques

1.1.1.1 Le flux

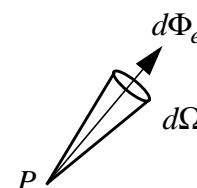
Soient une surface S , réelle ou fictive, plane ou gauche, et un contour fermé C qui limite cette surface à une aire finie A . L'énergie qui traverse A , dans un sens donné et par unité de temps, est appelée le **flux énergétique** Φ_e (le terme anglais est : «*radiant flux*») ou la **puissance rayonnante** P_e («*radiant power*»).



unité : le watt (W).

1.1.1.2 L'intensité

L'**intensité énergétique** I_e («*radiant intensity*»), d'une source ponctuelle P dans une direction donnée, est le quotient du flux énergétique $d\Phi_e$ quittant la source et se propageant dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction considérée, par cet élément d'angle solide.

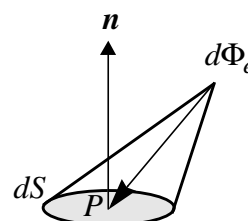


$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-1)$$

unité : le watt par stéradian (W.sr⁻¹).

1.1.1.3 L'éclairement

L'**éclairement énergétique** E_e («*irradiance*»), en un point P d'une surface, est le quotient du flux énergétique $d\Phi_e$ reçu par un élément de surface dS contenant le point P , par l'aire de cet élément de surface dS .

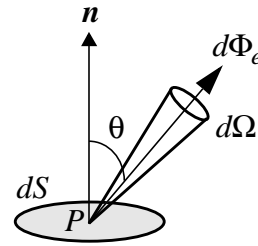


$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-2)$$

unité : le watt par mètre carré (W.m⁻²).

1.1.1.4 La luminance

La **luminance énergétique** L_e («*radiance*»), dans une direction donnée, en un point P d'une surface réelle ou fictive, est le quotient du flux énergétique $d\Phi_e$ quittant un élément de surface dS en ce point P et se propageant dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, par le produit de l'élément d'angle solide et de l'aire de la projection orthogonale de l'élément de surface sur un plan perpendiculaire à la direction donnée.



$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos(\theta)} \quad (1-3)$$

unité : le watt par mètre carré par stéradian ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$).

En introduisant la définition (1-1), la luminance L_e et l'intensité I_e sont reliées par la relation :

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos(\theta)} \quad (1-4)$$

1.1.2 Les grandeurs et unités photométriques

1.1.2.1 L'observateur de référence de la CIE

L'œil humain est un système optique très compliqué de part sa constitution et son principe de fonctionnement. Pour avoir une vue globale mais précise de son anatomie et de sa physiologie, le lecteur pourra se référer au livre de R. Sève [SEV 96]. Dans ce qui suit, l'œil est considéré comme un détecteur de radiations électromagnétiques, et comme tout détecteur il n'est sensible qu'à une bande limitée du spectre. Seules les radiations de puissance suffisante et de longueur d'onde comprise entre 380 et 780 nm¹ peuvent stimuler l'œil. Cette partie du spectre est communément appelée la «région visible» du spectre ou simplement la «lumière».

La sensibilité de l'œil dépend de nombreux facteurs dont la longueur d'onde (ou couleur) de la lumière et l'intensité de cette lumière. De plus, pour des conditions d'observation identiques, la perception d'un rayonnement dépend de l'observateur. Cette nature subjective de la vision place les grandeurs photométriques à part des grandeurs physiques présentées dans le paragraphe 1.1.1. Le but de la photométrie est de mesurer la lumière, de telle sorte que les résultats de ces mesures soient le plus possible corrélés avec une sensation visuelle.

1. Il n'y a pas de limites précises pour le domaine spectral du rayonnement visible ; ces limites dépendent du flux énergétique qui atteint la rétine et des capacités visuelles de l'observateur. La limite inférieure est généralement prise entre 360 et 400 nm et la limite supérieure entre 760 et 830 nm.

En photométrie, trois domaines de vision sont distingués. Ils dépendent de la «brillance» de la source, c'est-à-dire de la sensation lumineuse qu'a l'observateur (fig. 1.1) :

- le domaine photopique pour lequel l'œil est adapté à la vision diurne, la «brillance» est élevée ;
- le domaine scotopique pour lequel l'œil est adapté à la vision nocturne, la «brillance» est faible ;
- le domaine mésopique pour lequel l'œil est adapté à des niveaux intermédiaires de «brillance».

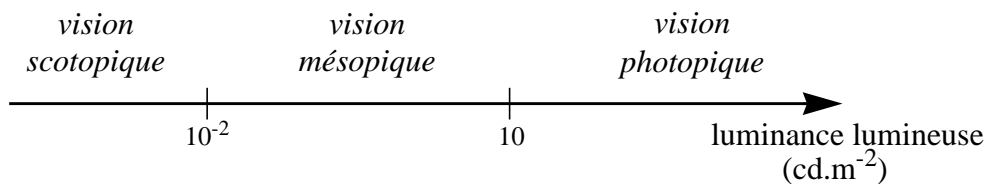


Figure 1.1 Les domaines de la vision.

Les sensations visuelles induites par un rayonnement lumineux sont très variables d'une personne à une autre. C'est pour cette raison que la CIE a défini un observateur «moyen» : l'**observateur de référence photométrique CIE**. Cet observateur fictif est caractérisé par les fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, qui représentent l'efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil («*spectral luminous efficiency*») respectivement dans le domaine photopique et le domaine scotopique. Ces fonctions sont définies par le rapport du flux énergétique de longueur d'onde λ_m , au flux de longueur d'onde λ , ces deux rayonnements produisant des sensations lumineuses de même intensité. La valeur de λ_m est choisie de telle façon que le maximum de ce rapport soit de 1. Pour $V(\lambda)$, la longueur d'onde la plus efficace est $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ (jaune), alors que pour $V'(\lambda)$ l'œil a une meilleure sensibilité pour $\lambda'_m = 507 \text{ nm}$ (vert).

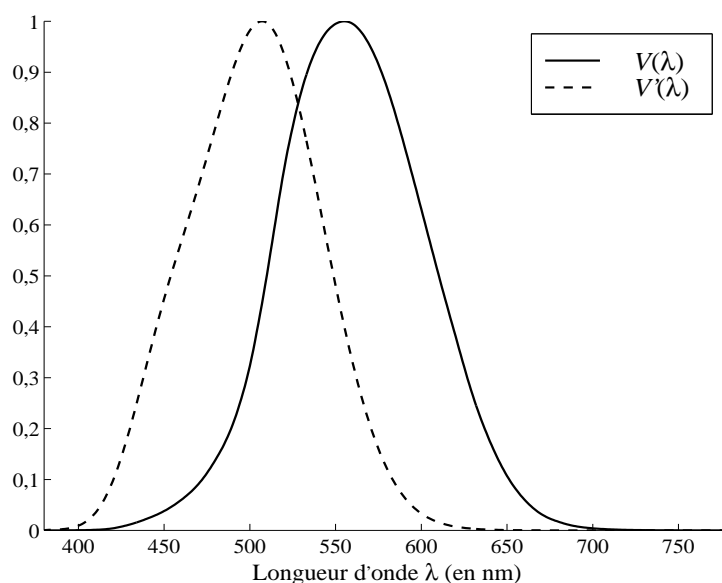


Figure 1.2 Efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ (d'après [CIE 87]).

Les courbes de $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, représentées sur la figure 1.2, sont le résultat de multiples et méticuleuses expériences qui se sont étalées de 1899 à 1923. Ces courbes ont été adoptées par la CIE, respectivement en 1924 et 1951, et par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM), en 1972 et 1974.

1.1.2.2 Les unités de la photométrie

À l'aide des fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, les grandeurs radiométriques peuvent maintenant être reliées aux grandeurs photométriques. Pour une grandeur énergétique quelconque, notée X_e ², sa densité spectrale est définie par :

$$X_{e,\lambda}(\lambda) = \frac{dX_e}{d\lambda}$$

Dans le domaine photopique, la grandeur photométrique X_v et la grandeur énergétique X_e sont associées par la relation :

$$X_v = K_m \int_{380}^{780} X_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1-5)$$

où K_m est une constante de proportionnalité³.

Dans le cas où X_e représente le **flux énergétique** Φ_e , son équivalent photométrique, le **flux lumineux** Φ_v est défini par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur l'observateur de référence de la CIE. L'unité du flux lumineux est appelée le lumen (lm) et dans l'équation (1-5), la constante K_m a donc comme unité le lumen par watt (lm.W⁻¹).

À l'origine, les unités photométriques ont été établies empiriquement avant que leur rapport avec les unités énergétiques du Système International ne soit correctement défini. Le lien entre ces deux systèmes d'unités se fait par l'intermédiaire de la constante K_m dont la valeur est aujourd'hui fixée à 683 lm.W⁻¹. Ainsi, une source de rayonnement monochromatique de longueur d'onde $\lambda_m = 555$ nm et qui émet un flux énergétique de 1 watt, produit un flux lumineux de 683 lumens.

Si le domaine de vision est le domaine scotopique, le raisonnement précédent est de nouveau utilisé. Dans l'équation (1-5), $V(\lambda)$ et K_m sont alors remplacées respectivement par $V'(\lambda)$ et K'_m . La valeur de la constante K'_m est fixée à 1700 lm.W⁻¹. Pour la longueur d'onde du maximum de sensibilité, l'œil est donc 2,5 fois plus sensible quand il est adapté aux luminances du domaine scotopique, plutôt qu'aux luminances du domaine photopique.

Toutes les grandeurs énergétiques rappelées dans le paragraphe 1.1 doivent donc être redéfinies dans le domaine de la photométrie. En fait, elles sont identiques dans leurs défini-

2. Conventionnellement, les grandeurs énergétiques sont indicées par e et les grandeurs photométriques par v . Dans les deux cas, si la grandeur est spectrale, l'indice λ est ajouté.

3. Dans l'équation (1-5), l'intégration se fait sur tout le spectre, c'est-à-dire pour λ variant de 0 à ∞ . Mais, $V(\lambda)$ étant nulle pour des longueurs d'onde en dehors de l'intervalle 380-780 nm, les bornes de l'intégrale se simplifient.

tions, car il suffit simplement de remplacer la notion de flux énergétique Φ_e par celle de flux lumineux Φ_v .

Les unités des différentes grandeurs photométriques sont les suivantes :

- le lumen (lm) pour le **flux lumineux** Φ_v («*luminous flux*»),
- la candela (cd) pour l'**intensité lumineuse** I_v («*luminous intensity*»),
- le lux (lx) pour l'**éclairement lumineux** E_v («*illuminance*»),
- la candela par mètre carré (cd.m^{-2}) pour la **luminance lumineuse** ou **visuelle** L_v («*luminance*»).

Lors de la conduite nocturne en milieu urbain, la vision de l'automobiliste se trouve dans le domaine de la partie supérieure de la vision mésopique. Cependant, les différences étant faibles avec le domaine photopique, la courbe de sensibilité spectrale $V(\lambda)$ est utilisée.

1.2 La réflexion de la lumière

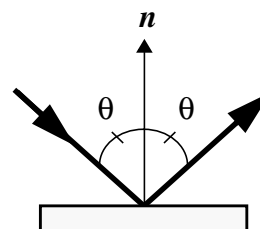
1.2.1 Les propriétés de réflexion des matériaux

La réflexion est le phénomène de renvoi d'un rayonnement par une surface ou un milieu, sans changement de fréquence de ses composantes monochromatiques. Une partie du rayonnement tombant sur un milieu est réfléchi à la surface du milieu (réflexion de surface), tandis qu'une autre partie peut être rétrodiffusée de l'intérieur du milieu (réflexion de volume). Suivant la répartition spatiale du rayonnement réfléchi, plusieurs types de réflexions sont distingués et rappelés dans les paragraphes suivants.

1.2.1.1 La réflexion spéculaire

La **réflexion spéculaire** ou **régulière** («*specular or regular reflection*»), est la réflexion qui obéit aux lois de l'optique géométrique.

D'après les lois de Snell-Descartes, l'angle d'incidence θ du rayonnement est égal à l'angle de réflexion ([MAY 96], §7.1). Le plan d'incidence, qui est défini par la direction d'incidence et la normale à la surface, est confondu avec le plan de réflexion défini par la direction de réflexion et la normale à la surface.



Lors d'une réflexion du type spéculaire, l'énergie incidente transportée par le rayonnement, se décompose en deux parties : une réfléchi et une transmise. La proportion relative de

ces deux composantes dépend de l'angle d'incidence θ de la lumière et de la nature du matériau composant la surface, caractérisé par son indice de réfraction n . Après son interaction avec la surface, le champ électrique incident donne naissance à un champ électrique réfléchi et/ou transmis. Ces deux champs sont proportionnels au champ incident.

Suivant la polarisation du champ électrique incident, polarisation perpendiculaire (s) ou parallèle (p) au plan d'incidence, les coefficients de proportionnalité sont donnés par les relations de Fresnel (pour une démonstration complète de ces relations, voir [MAY 96], §7.3). Dans le cas de la réflexion, ils sont notés R_s ou R_p , et ont pour expression :

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{\cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{\cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}} \\ R_p &= \frac{n^2 \cos(\theta) - \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}}{n^2 \cos(\theta) + \sqrt{n^2 - \sin^2(\theta)}} \end{aligned} \quad (1-6)$$

Le facteur de Fresnel F de la surface est donné par le carré d'un des deux coefficients. Mais en général, la lumière a une polarisation quelconque et le facteur de Fresnel de la surface est le résultat d'une combinaison linéaire des carrés de R_s et R_p , pondérés respectivement par les amplitudes A_s et A_p des composantes (s) et (p) du champ électrique incident. Le facteur de Fresnel $F(\theta, n)$ est alors défini par :

$$F(\theta, n) = \frac{|A_s R_s|^2 + |A_p R_p|^2}{|A_s|^2 + |A_p|^2} \quad (1-7)$$

Cependant, dans le domaine de l'éclairage, la lumière utilisée est généralement naturelle, c'est-à-dire non polarisée. Les composantes A_s et A_p du champ électrique sont donc statistiquement égales, ce qui permet de simplifier le facteur de Fresnel $F(\theta, n)$ qui devient :

$$F(\theta, n) = \frac{|R_s|^2 + |R_p|^2}{2} \quad (1-8)$$

Les variations du facteur de Fresnel F en fonction de l'angle d'éclairage θ sont lentes pour les incidences proches de la normale ; F est pratiquement constant jusqu'à un angle d'incidence de 50° . Puis, F augmente rapidement pour tendre vers 1, quand l'angle d'incidence θ tend vers 90° (fig. 1.3).

Pour certains matériaux, l'indice de réfraction peut être complexe : ces matériaux ont la propriété d'absorber une partie de l'énergie de l'onde incidente. Un indice d'absorption κ est alors défini et l'indice du matériau devient $\tilde{n} = n - i\kappa$.

Les indices de réfraction n et d'absorption κ dépendent de la longueur d'onde λ de l'onde incidente. Mais dans la plupart des cas, ils varient peu dans la région visible du spectre et peuvent être considérés constants.

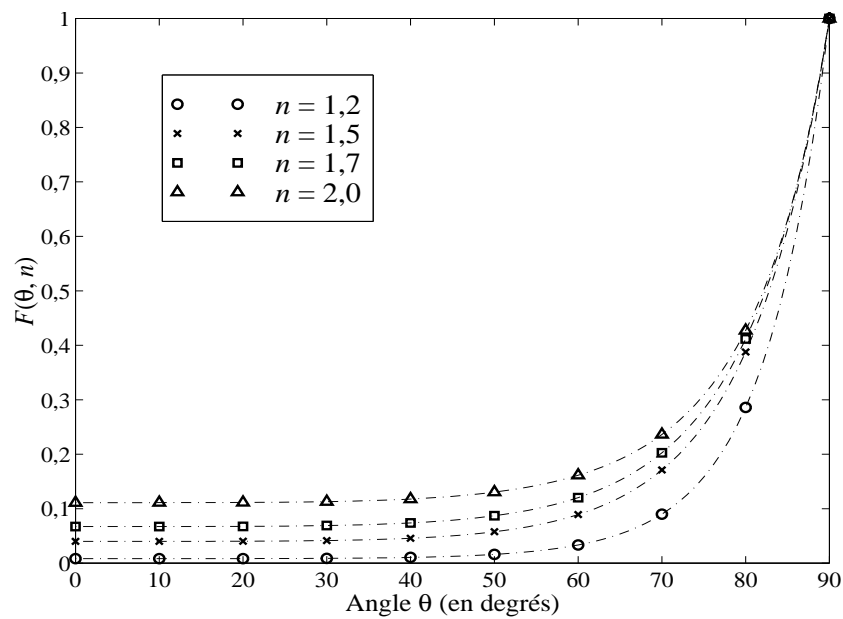
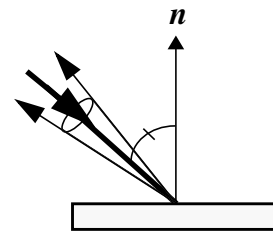


Figure 1.3 Facteur de Fresnel $F(\theta, n)$ pour différents indices de réfraction n .

1.2.1.2 La rétro réflexion

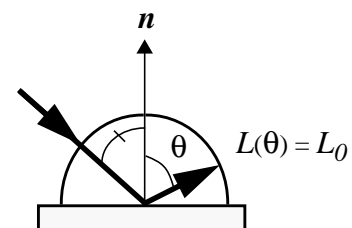
La **rétro réflexion** est une réflexion, caractérisée par le renvoi du rayonnement réfléchi par la surface, dans une direction proche de la direction d'incidence. Cette propriété doit être conservée pour des variations importantes de la direction d'incidence, en particulier pour les angles d'incidence rasants.



Le terme anglais pour la rétro réflexion est «*retroreflection*». Cependant, dans les publications, il apparaît très souvent le terme «*backscattering*» qui correspond à la lumière diffusée dans le demi-plan d'incidence, sans pour autant avoir une direction proche de la direction d'incidence. Ce terme n'a pas d'équivalent en français, mais pour éviter certaine lourdeur dans le texte, le terme «**rétrodiffusion**» est utilisé pour désigner ce type de réflexion.

1.2.1.3 La réflexion diffuse ou de Lambert

Une **réflexion diffuse** («*diffuse reflection*») est dite parfaite lorsque la totalité du rayonnement reçu par la surface est réfléchi en étant restitué avec une luminance constante, c'est-à-dire indépendante de la direction de réflexion. Si cette surface absorbe une partie de l'énergie incidente, alors elle est dite diffusante (en réflexion).



L'intensité I réfléchi par une surface parfaitement diffusante suit également un comportement particulier. En utilisant d'une part, les définitions de l'éclairement (1-2) et de la lumi-

nance (1-3) et d'autre part, la relation liant la luminance et l'intensité (1-4), la luminance L_0 , renvoyée dans toutes les directions de l'hémisphère supérieur à cette surface, est donnée par les égalités :

$$L_0 = \frac{E}{d\Omega \cos(\theta)} = \frac{I(\theta)}{dA \cos(\theta)}$$

où θ est l'angle entre la normale à la surface et la direction de réflexion, dA est l'aire de la surface réfléchissante qui a reçu l'éclairement E .

En posant $L_0 = I_0 / dA$ dans l'expression précédente, l'intensité I réfléchie par la surface parfaitement diffusante est donnée par la relation :

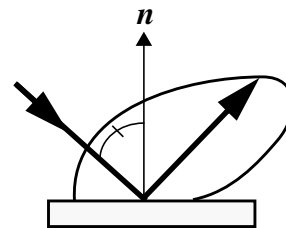
$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta) \quad (1-9)$$

où I_0 est la valeur maximale de l'intensité I dans la direction normale à la surface ($\theta = 0^\circ$). La loi donnée par l'équation (1-9) est connue sous le nom de loi (du cosinus) de Lambert.

1.2.1.4 La réflexion quelconque

La plupart des surfaces n'ont pas un comportement idéal. La répartition spatiale de la lumière qu'elles réfléchissent est un mélange de spécularité, de diffusion parfaite, de rétrodiffusion et parfois de rétroréflexion.

La part relative de ces composantes peut changer en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement arrivant sur la surface. Généralement, plus l'incidence est rasante, plus la réflexion est spéculaire. Inversement, pour les incidences proches de la normale, le comportement de ces surfaces est plutôt diffusant.



1.2.2 Caractérisation de la réflexion

Les propriétés réfléchissantes d'une surface rugueuse, en particulier d'une surface routière, peuvent être décrites à l'aide de plusieurs grandeurs. Les valeurs prises par ces grandeurs dépendent des caractéristiques de la surface réfléchissante. Les principaux facteurs sont la nature du matériau de la surface (nature chimique, propriétés physiques) et l'état de surface (polie, présence d'une microtexture ou d'une macrotexture).

1.2.2.1 L'indicatrice de diffusion

L'**indicatrice de diffusion** («*indicatrix of diffusion, scattering indicatrix*») est la représentation dans l'espace de la répartition spatiale de l'intensité I ou de la luminance L (énergéti-

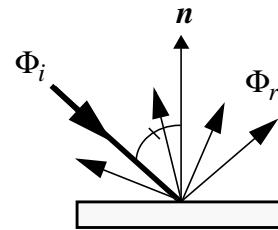
que ou lumineuse) réfléchi par une surface. Cette représentation se fait le plus souvent sous la forme d'une surface en coordonnées polaires, dont les rayons vecteurs ont pour module la valeur de I ou de L dans la direction de réflexion considérée. Le volume englobé par l'indicatrice de diffusion est appelé le solide photométrique.

Pour une surface diffusante en réflexion, l'indicatrice de diffusion prend une forme simple. Si l'intensité réfléchi I est représentée, les valeurs des rayons vecteurs sont données par l'équation (1-9) et l'indicatrice de diffusion est une sphère tangente à la surface. Pour la luminance réfléchi L , les rayons vecteurs sont tous égaux et l'indicatrice de diffusion a la forme d'un hémisphère posé sur la surface.

1.2.2.2 Le facteur de réflexion

Le **facteur de réflexion** («*reflectance*») est le rapport du flux réfléchi Φ_r au flux incident Φ_i pour un rayonnement incident de composition spectrale et de polarisation données :

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} \quad (1-10)$$



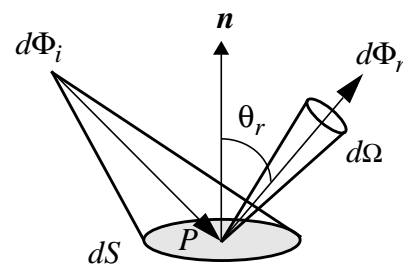
unité : sans.

Le facteur de réflexion ρ prend des valeurs comprises entre 0 et 1 ; dans le cas particulier où la surface est parfaitement réfléchissante, il est égal à 1. En outre, il ne fait pas intervenir la direction d'observation, car il intègre toutes les directions de l'hémisphère supérieure à la surface. Il donne donc uniquement la proportion de l'énergie réfléchi par la surface.

Dans la majorité des cas, la lumière réfléchi par une surface peut être décomposée en une composante régulière (§ 1.2.1.1) et une composante diffuse (§ 1.2.1.3). Deux facteurs de réflexion sont alors définis : le facteur de réflexion régulière ρ_r («*regular reflectance*») et le facteur de réflexion diffuse ρ_d («*diffuse reflectance*»). Le facteur de réflexion régulière ρ_r (diffuse ρ_d) est égal au rapport de la partie régulière (diffuse) du flux total réfléchi, au flux incident. Ces deux facteurs vérifient l'égalité $\rho = \rho_r + \rho_d$.

1.2.2.3 Le coefficient de luminance

Le **coefficient de luminance énergétique** ou **lumineuse**⁴ q , q_e ou q_v («*radiance or luminance coefficient*») est défini comme le quotient de la luminance énergétique ou lumineuse L (d'un élément de surface dans une direction donnée) par l'éclairement énergétique ou lumineux E produit par une source lumineuse et reçu par la surface :



$$q = \frac{L}{E} = \frac{d^2\Phi_r}{d\Phi_i d\Omega \cos(\theta_r)} \quad (1-11)$$

unité : en radiométrie, l'inverse du stéradian (sr^{-1}),

en photométrie, la candela par mètre carré lux ($\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$).

Contrairement au facteur de réflexion, le coefficient de luminance dépend de la direction d'observation. Il donne donc la répartition spatiale de la lumière réfléchie par la surface et ses valeurs peuvent aller de zéro à l'infini.

Le coefficient de luminance obéit à une loi importante de la physique : le principe de réciprocité de Helmholtz [LI 98]. Cette loi stipule que les directions d'éclairage et d'observation peuvent être interverties. Si la direction d'éclairage est donnée par (θ_i, ϕ_i) et la direction d'observation par (θ_r, ϕ_r) , le coefficient de luminance q vérifie l'égalité :

$$q(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = q(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i)$$

Pour une surface parfaitement diffusante en réflexion, c'est-à-dire pour une surface dont la luminance L est constante, le coefficient de réflexion q est constant. En utilisant la définition (1-11) et en l'intégrant sur tout l'hémisphère, la valeur de q est alors égale à $1/\pi$ (la valeur de l'intégration de $d\Omega \cos(\theta_r)$ vaut π). Ainsi, une surface diffusante, caractérisée par un facteur de réflexion ρ_d , a un coefficient de luminance q constant et égal à ρ_d / π .

1.2.2.4 Le facteur de luminance

Le **facteur de luminance énergétique** ou **lumineuse** β , β_e ou β_v («*radiance or luminance factor*») est le quotient entre la luminance L (d'un élément de surface dans une direction donnée) par la luminance L_d d'un diffuseur parfait par réflexion (§ 1.2.1.3) :

$$\beta = \frac{L}{L_d} = \pi \frac{d^2\Phi_r}{d\Phi_i d\Omega \cos(\theta_r)}$$

unité : sans.

Le facteur de luminance β permet de comparer la répartition spatiale de la lumière réfléchie par une surface quelconque à celle d'un diffuseur parfait. Le coefficient de luminance q et le facteur de luminance β sont liés par la relation $\beta = \pi q$. Dans le cas d'une surface diffusante en réflexion, le facteur de luminance est donc ρ_d .

4. Dans le domaine de la synthèse d'image, la notion de «*Bi-directional Reflectance Distribution Function*» est très souvent rencontrée. Sa définition est proche de celle du coefficient de luminance q , car à la place l'éclairement E c'est l'intensité incidente I qui est considérée. Cependant, ce coefficient n'est pas défini par la CIE et son nom n'est pas normalisé.

1.3 Cas des surfaces routières : les recommandations de la CIE

Au début des années 1980, la CIE a publié une recommandation technique pour aider les concepteurs de projets d'éclairage public à prendre en compte les propriétés réfléchissantes des chaussées lors du dimensionnement des installations d'éclairage [CIE 95]. Ce rapport fait une synthèse de différents travaux sur les caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée. De ce travail, il ressort une méthode de mesure des propriétés réfléchissantes de ces matériaux. Un système de classification des revêtements a également été établi.

1.3.1 Mesure du coefficient de luminance

La CIE a adopté un système d'angle pour le repérage dans l'espace des directions d'éclairage et d'observation. Ce système est adapté au cas de l'éclairage public et il diffère du système classique des coordonnées sphériques (fig. 1.4). Les valeurs des angles de la CIE sont toujours exprimées en degrés et ces angles sont définis de la façon suivante :

- α : angle d'observation,
- β : angle entre le plan d'éclairage et le plan d'observation,
- γ : angle d'éclairage,
- δ : angle entre le plan d'observation et l'axe de la route, c'est l'angle d'isotropie.

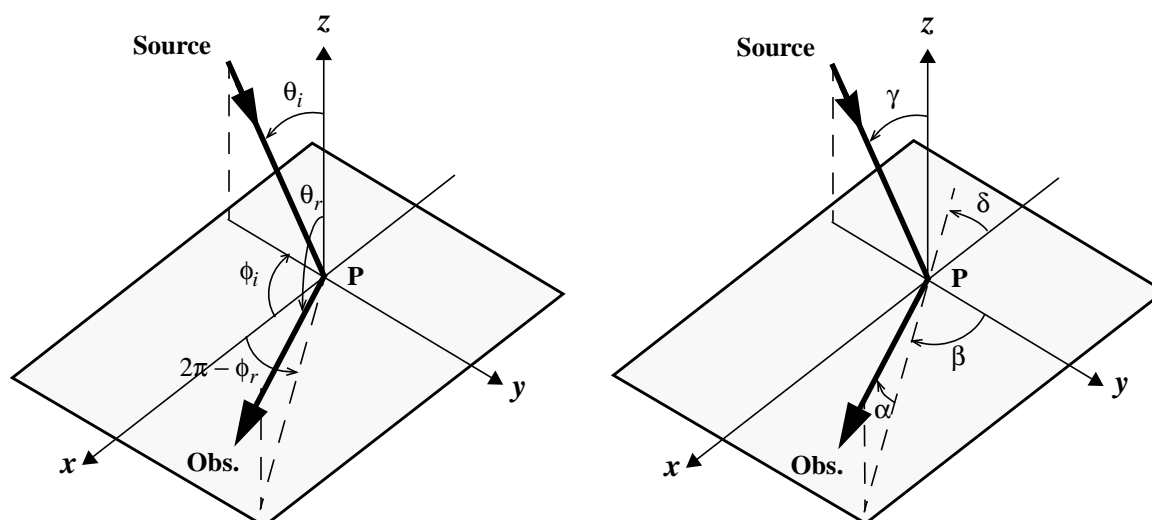


Figure 1.4 Définition des angles d'éclairage et d'observation : à gauche en coordonnées sphériques, à droite dans le système de la CIE. Pour le système de la CIE, l'axe de la route est confondu avec l'axe Ox .

Les angles définis par la CIE peuvent être exprimés en fonction des angles habituels des coordonnées sphériques. D'après la figure 1.4, il existe entre ces angles les relations suivantes :

$$\begin{aligned}\alpha &= 90^\circ - \theta_r \\ \beta &= 180^\circ - (\phi_r + \phi_i) \\ \gamma &= \theta_i \\ \delta &= \phi_r\end{aligned}$$

Les caractéristiques photométriques d'un revêtement de chaussée sont déterminées à partir de la mesure du coefficient de luminance q en un point P pour différentes directions d'éclairage et d'observation.

Dans le cas de la conduite automobile, un automobiliste observe une section de route située entre 60 et 160 mètres en avant du véhicule, ses yeux étant placés à une hauteur de 1,5 mètre par rapport à la chaussée. Dans cette situation, l'angle α prend des valeurs comprises entre $0,5^\circ$ et $1,5^\circ$ et dans cet intervalle, la dépendance suivant α du coefficient de luminance q est négligeable. Par convention, les mesures de q sont alors réalisées pour une valeur unique de α fixée à 1° .

Par ailleurs, l'angle δ reste toujours inférieur en valeur absolue à 20° . Pour cet intervalle de variation de δ , des études ont montré que les surfaces routières sont assez homogènes pour ne pas présenter de direction privilégiée. Elles sont donc isotropes, ce qui permet de négliger l'influence de l'angle δ . Finalement, le coefficient de luminance q des surfaces routières ne dépend donc plus que des deux angles β et γ :

$$q(\alpha = 1^\circ, \beta, \gamma, \delta = 0^\circ) = q(\beta, \gamma) \quad (1-12)$$

Remarque :

La scène de nuit représentée par l'image de la figure 1.5, montre que la portion de chaussée vue sous cet angle α de 1° (le quadrilatère hachuré) ne représente qu'une faible partie du champ visuel global d'un l'automobiliste.

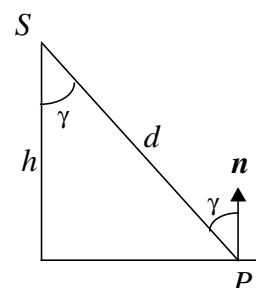


Figure 1.5 Portion de chaussée vue sous un angle α de 1° .

À la place du coefficient q , les éclairagistes préfèrent utiliser le coefficient de luminance réduit, noté r . Ce coefficient est lié aux conditions géométriques spécifiques des installations d'éclairage extérieur.

En effet, pour un luminaire positionné à une hauteur h au dessus de la chaussée, la distance d entre la source et le point P de la chaussée, est égale au rapport de h par $\cos(\gamma)$.

La loi de Bouguer et la loi du cosinus [AFE 85] permettent de calculer l'éclairement horizontal reçu au point P : $E = I \cdot \cos(\gamma) / d^2$. L'utilisation de cette loi et de la définition du coefficient de luminance (1-11), donne pour la luminance L , au point P de la chaussée éclairée par un seul luminaire, l'expression suivante :



$$L = qE = q \frac{I \cos^3(\gamma)}{h^2} = r \frac{I}{h^2}$$

Dans cette égalité, le coefficient de luminance réduit r est défini en fonction du coefficient de luminance q et de l'angle d'éclairage γ :

$$r(\beta, \tan(\gamma)) = q(\beta, \gamma) \cos^3(\gamma)$$

r a la même unité que q , c'est-à-dire le $\text{cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$.

L'identification des propriétés photométriques d'un revêtement routier est réalisée en mesurant à l'aide d'un gonioréfectomètre (cf. § 3.1), le coefficient de luminance réduit r , pour une série d'angles β et de tangentes de l'angle γ spécifiée par la CIE, soit au total 580 points de mesure :

- $\beta \in \{0 ; 2 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 ; 45 ; 60 ; 75 ; 90 ; 105 ; 120 ; 135 ; 150 ; 165 ; 180\}$,
- $\tan(\gamma) \in \{0 ; 0,25 ; 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,25 ; 1,5 ; 1,75 ; 2 ; 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4 ; 4,5 ; 5 ; 5,5 ; 6 ; 6,5 ; 7 ; 7,5 ; 8 ; 8,5 ; 9 ; 9,5 ; 10 ; 10,5 ; 11 ; 11,5 ; 12\}$.

Une méthode de mesure a également été définie par la CIE. Celle-ci fixe en particulier les dimensions de la surface éclairée et le type de la source de lumière. Il faut aussi remarquer que pour la CIE, la surface mesurée est toujours fixe par rapport à l'observateur. La source de lumière se déplace autour du point P par l'intermédiaire des variations des angles β et γ et décrit ainsi l'hémisphère supérieur à la surface.

Remarque :

Dans le domaine de la synthèse d'image, les variations spatiales du coefficient de luminance sont données à l'aide du système d'angle en coordonnées sphériques. Dans ce cas, la surface éclairée est fixe par rapport à l'éclairage et c'est l'observateur qui se déplace autour du point P . Dans ces conditions, les coefficients de luminance mesurés avec chacun des deux systèmes ne sont pas rigoureusement identiques. Pour obtenir les mêmes résultats, il faut que la surface ait une réponse photométrique isotrope.

1.3.2 Les paramètres descriptif Q_0 et S_1

Deux paramètres ont été définis par la CIE pour résumer le pouvoir de réflexion d'un revêtement de chaussée.

Le coefficient de luminance moyen Q_0 qui décrit la clarté du revêtement :

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega_0} \int_{\Omega_0} q d\Omega \quad \text{avec } d\Omega = \sin(\gamma) d\gamma d\beta$$

où Ω_0 est l'angle solide, défini en un point P de la chaussée, contenant toutes les directions d'incidence de la lumière prises en compte pour le calcul de la luminance en ce point. Pour ce calcul, les luminaires retenus sont ceux situés, par rapport au point P , à une distance inférieure à $3h$ dans le sens transversal de la chaussée et inférieure à $4h$ dans la direction de l'observateur et $12h$ dans la direction opposée dans le sens longitudinal, h représentant la hauteur du luminaire (fig. 1.6). Les luminaires situés à l'extérieur de cette zone contribuent faiblement à la luminance au point P et sont donc négligés.

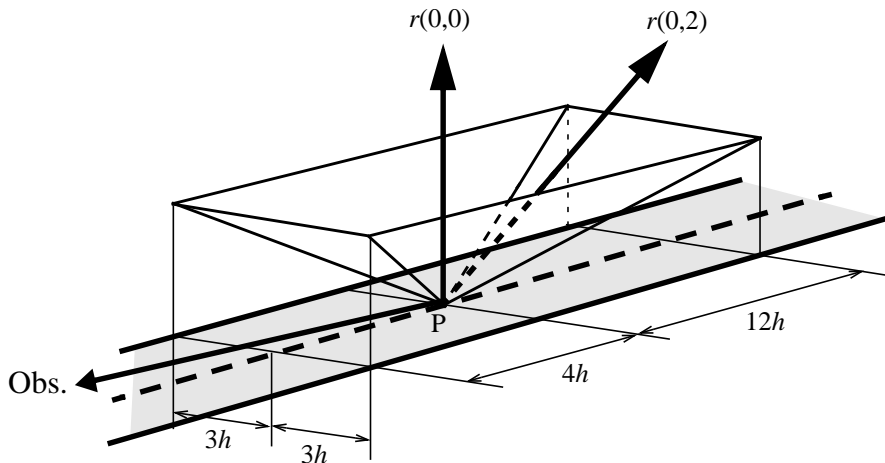


Figure 1.6 Visualisation des limites d'intégration pour le calcul de Q_0 et des directions d'éclairage pour le calcul de S_1 .

Le coefficient Q_0 prend des valeurs voisines de 0,05 pour une chaussée en enrobé sombre et de l'ordre de 0,13 pour une chaussée en enrobé clair. Une valeur de Q_0 proche de 0,32 correspond à un matériau très peu absorbant qui réfléchit quasiment la totalité de l'énergie lumineuse qu'il reçoit.

Le facteur de spécularité S_1 , qui décrit le caractère spéculaire du revêtement, est défini conventionnellement par :

$$S_1 = \frac{r(0, 2)}{r(0, 0)} \quad (1-13)$$

Le coefficient de luminance réduit $r(0, 2)$ est pris pour $\beta = 0^\circ$ et $\tan(\gamma) = 2$, soit $\gamma = 63,4^\circ$. Dans ces conditions, l'observateur et la source d'éclairage sont situés de part et d'autre du point de mesure P , la distance du luminaire à P étant égale à $2h$ (fig. 1.6). Le coefficient de luminance réduit $r(0, 0)$ est pris pour $\beta = 0^\circ$ et $\tan(\gamma) = 0$, c'est-à-dire lorsque le luminaire se trouve à la verticale du point P .

1.3.3 Classification des surfaces routières et définition de revêtements types

1.3.3.1 La classification utilisée en France

L'établissement du tableau des valeurs du coefficient de luminance réduit r , relatif à la chaussée concernée est souvent difficile du fait de l'impossibilité de prélever sur site un échantillon représentatif afin de l'étudier en laboratoire. Pour cette raison et dans un souci de standardisation, la CIE a proposé un système de classification des surfaces routières appelé le système de classification R.

Les revêtements de chaussée ont ainsi été regroupés en 4 classes en fonction de leur facteur de spécularité. La CIE a également établi, pour chaque classe, une table type du coefficient de luminance réduit caractéristique de la classe, les revêtements type ainsi définis pouvant alors être utilisés lors du calcul des luminances ponctuelles de la chaussée.

Classe	Limites de la classe	Revêtement type	
		S_1	Q_0
R1	$S_1 < 0,42$	0,25	0,10
R2	$0,42 \leq S_1 < 0,85$	0,58	0,07
R3	$0,85 \leq S_1 < 1,35$	1,11	0,07
R4	$1,35 \leq S_1$	1,55	0,08

Tableau 1.1 : Définition du système de classification R.

1.3.3.2 Autres classifications utilisées en Europe

D'autres systèmes de classification existent et sont utilisés en Europe. Il s'agit :

- du système de classification N à 4 classes utilisé par les pays scandinaves,
- du système de classification C à 2 classes.

Les tableaux 1.2 et 1.3 donnent respectivement, pour les systèmes de classification N et C, les valeurs limites du facteur S_1 définissant les différentes classes ainsi que les valeurs de Q_0 et S_1 correspondant aux revêtements type associés.

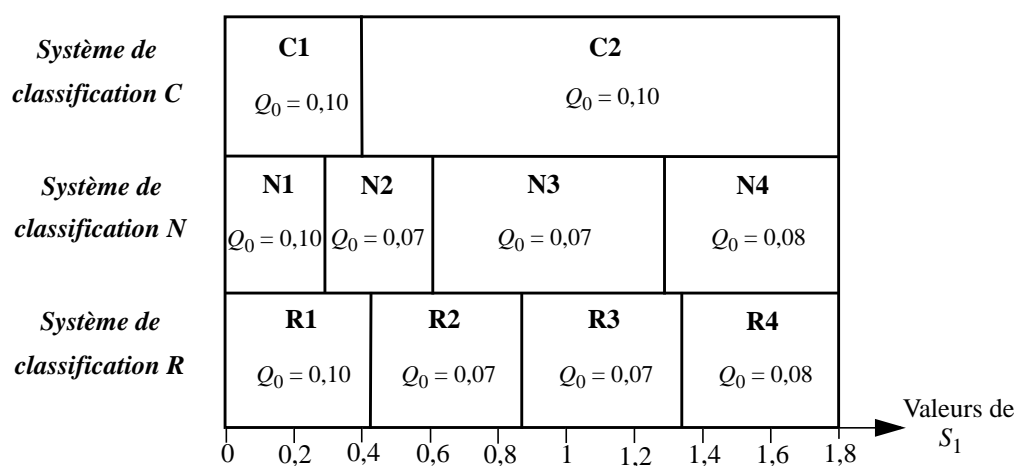
Le système de classification N a été déterminé à partir de mesures réalisées en Scandinavie où des traitements de surface sont souvent appliqués sur les revêtements de chaussée afin d'éclaircir et de rendre diffusantes ces surfaces. Les domaines des classes N1 et N2 sont donc plus réduits que ceux des classes R1 et R2 alors que la classe N3 regroupe la classe R3 et une partie de la classe R2.

Le système de classification C comprend uniquement 2 classes, la classe C1 correspond approximativement à la classe R1 et la classe C2 regroupe les classes R2, R3 et R4.

Classe	Limites de la classe	Revêtement type	
		S_1	Q_0
N1	$S_1 < 0,28$	0,18	0,10
N2	$0,28 \leq S_1 < 0,60$	0,41	0,07
N3	$0,60 \leq S_1 < 1,30$	0,88	0,07
N4	$1,30 \leq S_1$	1,61	0,08

Classe	Limites de la classe	Revêtement type	
		S_1	Q_0
C1	$S_1 < 0,40$	0,24	0,10
C2	$0,40 \leq S_1$	0,97	0,07

Une comparaison entre ces trois classifications est résumée dans le tableau 1.4.



1.3.3.3 Prise en compte des caractéristiques photométriques lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage

Lors du dimensionnement d'une installation d'éclairage, le prélèvement d'un échantillon sur site permettant la mesure du coefficient de luminance réduit de la chaussée n'est pas toujours possible. La classe à laquelle appartient le revêtement ainsi que sa clarté doivent donc être estimées à partir de mesures antérieures réalisées sur des revêtements similaires.

Pour réaliser le calcul de la luminance de la chaussée, le tableau type de la CIE, correspondant à la classe à laquelle le revêtement a été rattaché, est utilisé. Si la valeur du coefficient Q_0 du revêtement est différente de celle du revêtement type utilisé, les valeurs du coefficient de luminance réduit devront être pondérées par un facteur multiplicatif c traduisant la différence de clarté des deux revêtements. Ce facteur c est égal à :

$$c = \frac{Q_0 \text{ estimé}}{Q_0 \text{ du tableau type}}$$

CHAPITRE 2

Réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses

Dans ce chapitre, une approche théorique de la réflexion de la lumière par des surfaces rugueuses est abordée.

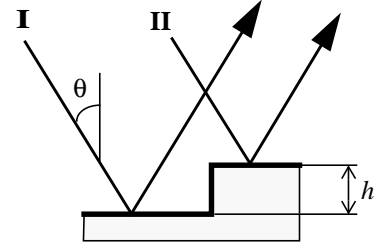
Les deux premiers paragraphes présentent des remarques générales. Il s'agit tout d'abord d'introduire la notion de rugosité d'une surface vis-à-vis de la lumière (§2.1). Puis, un résumé de nombreuses observations expérimentales est donné (§2.2). Ces observations ont permis de proposer une décomposition la lumière réfléchiée en trois parties : une spéculaire, une diffuse directionnelle et une diffuse uniforme.

De ces trois composantes, seule la composante diffuse directionnelle a été l'objet de nombreuses études (§2.3.1) et différents modèles en proposent une formulation analytique pour les surfaces rugueuses décrites par des lois statistiques. Parmi ces modèles, le «modèle de l'approximation de Kirchhoff» est l'un des plus classiques. Il est développé dans le paragraphe 2.3.3.

Les effets de «masquage / ombrage», qui modifient sous certaines conditions d'éclairage et d'observation la répartition de la lumière réfléchiée, sont également décrits (§2.3.4). Enfin, dans une dernière partie (§2.3.6), les hypothèses du «modèle de l'approximation de Kirchhoff» sont reprises et commentées dans le cas particulier des revêtements de chaussées.

2.1 Un critère de rugosité

Une surface rugueuse qui présente des gradients de hauteur, peut être schématisée par une marche d'escalier de hauteur h . Cette marche entraîne une différence de chemin optique entre les deux rayons incidents parallèles **I** et **II** qui se réfléchissent sur la surface. En fonction de la hauteur de la marche et de l'angle d'incidence θ , la différence de chemin optique Δd est donnée par :



$$\Delta d = 2h \cos(\theta)$$

À la différence de chemin optique Δd correspond une différence de phase $\Delta\phi$ égale à :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d = \frac{4\pi h}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2-1)$$

Après leur réflexion sur la surface, les deux rayons **I** et **II** interfèrent et l'amplitude de ces interférences dépend de la valeur de $\Delta\phi$ comparée à π . Pour $\Delta\phi \ll \pi$, les deux rayons sont considérés en phase : ils donnent des interférences constructives et la surface se comporte comme une surface lisse. À l'inverse, pour $\Delta\phi \approx \pi$, les deux rayons ont des interférences destructives et la surface se comporte comme une surface rugueuse.

Le passage d'une surface lisse à une surface rugueuse se fait progressivement et il est difficile de fixer une limite pour $\Delta\phi$. Le «critère de Rayleigh» suppose que si $\Delta\phi < \pi / 2$ alors la surface est lisse, alors que pour $\Delta\phi > \pi / 2$ elle est rugueuse ([BEC 63], §2.1). Mais, le choix de la valeur de $\Delta\phi$ est arbitraire, et d'autres valeurs peuvent être choisies (par exemple, $\pi / 4$ ou $\pi / 8$). Afin de respecter l'idée de base de Rayleigh, Beckmann recommande d'utiliser comme critère de rugosité le terme de droite de l'équation (2-1). En outre, pour une surface rugueuse quelconque caractérisée par son écart-type des hauteurs σ , la hauteur h est remplacée par σ . Le critère de Rayleigh R_a devient :

$$R_a = \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos(\theta) \quad (2-2)$$

Une surface est donc considérée comme parfaitement lisse quand le rapport σ / λ tend vers 0, ou que l'angle d'incidence θ tend vers $\pi / 2$.

Contrairement à d'autres paramètres caractérisant une surface (par exemple l'écart-type des hauteurs σ), la rugosité de la surface vis-à-vis de la lumière n'est pas une propriété intrinsèque de la surface. Le critère de Rayleigh R_a donne uniquement une mesure relative de la rugosité de la surface, car il dépend de la longueur d'onde λ de la lumière et de son angle d'incidence θ . Ainsi, la surface est d'autant moins rugueuse que la longueur d'onde est grande et que l'angle d'incidence est rasant (fig. 2.1).

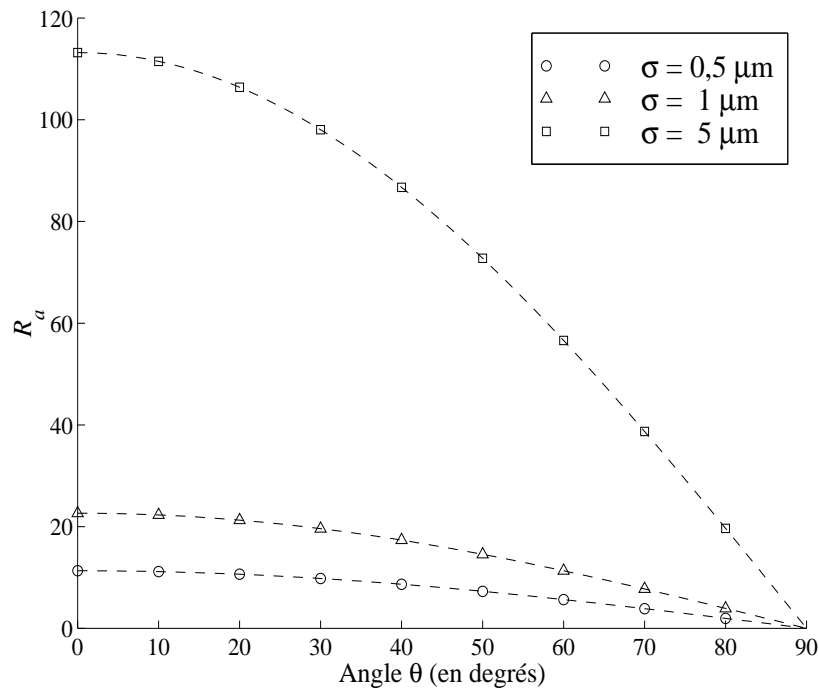


Figure 2.1 Variations du critère de Rayleigh R_a en fonction de l'angle θ et de l'écart-type σ des hauteurs de la surface rugueuse ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$).

Dans ces conditions, une surface routière apparaît rugueuse en lumière visible, mais lisse pour les ultrasons (longueur d'onde typique de quelques millimètres ce qui donne une valeur de R_a de l'ordre de 1). De même, une chaussée a un comportement quasi-spéculaire quand elle est éclairée par des projecteurs automobiles, alors qu'elle a un comportement plutôt diffusant sous l'éclairage public.

2.2 Décomposition de la lumière réfléchie par une surface

Le cas le plus simple est celui des surfaces planes et polies, c'est-à-dire sans rugosité. Quel que soit le matériau de ces surfaces (conducteur parfait ou diélectrique, homogène ou hétérogène), l'intensité lumineuse incidente I_i donne naissance à une intensité réfléchie spéculaire I_{sp} («*specular intensity*») génératrice de l'image et du reflet de la source lumineuse. En général, elle n'est pas colorée, sauf pour les métaux. Cependant, pour les milieux hétérogènes, une partie de l'intensité transmise dans le matériau est réémise dans toutes les directions sous la forme de lumière diffuse I_{du} . Cette lumière est le plus souvent colorée, car elle a interagi avec le milieu [JEN 65].

Quand la lumière se réfléchit sur une surface rugueuse, les observations précédentes sont modifiées [CIE 86]. L'intensité spéculaire I_{sp} s'atténue avec l'augmentation de l'amplitude des irrégularités de la surface. Une partie de la lumière incidente est maintenant diffusée par les

irrégularités et renvoyée sous la forme d'une intensité lumineuse de diffusion I_{dd} («*scattering intensity*»). La dispersion de cette lumière autour de la direction de spécularité augmente avec les irrégularités de la surface. L'image de la source, qui n'apparaît plus nettement mais qui peut encore subsister d'une façon atténuée, est alors entourée d'un halo plus ou moins important.

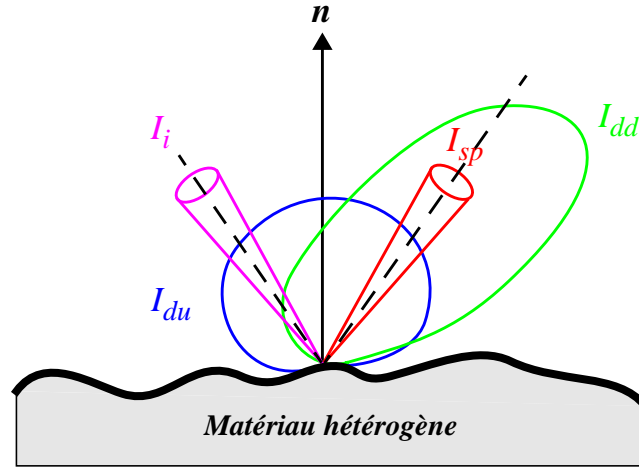


Figure 2.2 Décomposition de la lumière réfléchie par la surface rugueuse d'un matériau hétérogène.

D'après les observations précédentes, l'intensité lumineuse réfléchie par une surface rugueuse peut être décomposée en trois parties indépendantes. Chacune d'elles met en jeu des phénomènes physiques différents :

$$I(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = I_{sp}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) + I_{dd}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) + I_{du}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) \quad (2-3)$$

où θ_i est l'angle d'incidence, θ_r et ϕ_r sont les angles d'observation définis par la figure 1.4 du paragraphe 1.3.1. Les valeurs relatives des trois intensités vont dépendre de la rugosité de la surface, ainsi que de la composition du matériau hétérogène.

L'intensité $I_{sp}(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ est due uniquement à la réflexion simple du type spéculaire. Pour les surfaces rugueuses, elle se fait sur un plan fictif, le plan moyen de la surface. Mais, sa valeur relative par rapport aux deux autres composantes diminue rapidement quand la rugosité augmente. Dans le cas des surfaces routières, cette intensité est considérée comme nulle.

L'intensité diffuse directionnelle $I_{dd}(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ a pour origine uniquement les réflexions simples, ou du premier ordre, sur la surface («*first surface reflection*»). Mais, la rugosité de la surface fait apparaître des phénomènes de diffusion. Cela explique que cette composante de la lumière réfléchie n'a pas toujours son maximum dans une direction proche de celle de la spécularité et qu'elle se répartit principalement autour de cette direction [TOR 66].

Au contraire des deux précédentes, l'intensité diffuse uniforme $I_{du}(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ est due aux réflexions multiples («*multiple surface reflection*») de la lumière sur la surface rugueuse et à la diffusion de volume («*subsurface reflection*»). L'origine de la diffusion de volume est la

réflexion d'une partie de l'intensité transmise dans le matériau [JEN 65]. Cette lumière réfléchie sur les hétérogénéités du matériau de la surface peut ressortir de celui-ci et être ainsi réémise vers l'extérieur. L'intensité diffuse uniforme n'a pas de direction privilégiée [UET 92]. Le plus souvent, elle est identifiée à une diffusion parfaite (§ 1.2.1.3).

Il faut noter que l'égalité (2-3) est générale et valable pour toutes les grandeurs photométriques, puisque de simples transformations linéaires permettent de passer de l'une à l'autre. Pour le coefficient de luminance q de la surface, une composante spéculaire q_{sp} , une composante diffuse directionnelle q_{dd} et une composante diffuse uniforme q_{du} sont définies. Le coefficient de luminance q se décompose alors de la façon suivante :

$$q(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = q_{sp}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) + q_{dd}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) + q_{du}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) \quad (2-4)$$

Dans la suite de ce travail, l'aspect spectral de la lumière est ignoré. Dans les deux équations précédentes (2-3 et 2-4), la longueur d'onde λ de la lumière n'apparaît donc pas comme une variable.

2.3 Modèles physiques pour la réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses

2.3.1 Aperçu des connaissances actuelles

La diffusion d'une onde par une surface rugueuse a été étudiée pour la première fois par Rayleigh en 1907. Au début des années 1950, les études portant sur la réflexion des ondes radar ont permis d'améliorer considérablement nos connaissances. Aujourd'hui, de nombreux ouvrages traitent de ce sujet et proposent une synthèse de ces recherches. Les résultats présentés dans ces ouvrages sont obtenus pour des surfaces rugueuses périodiques ou aléatoires et sont généralement applicables aux ondes électromagnétiques ou aux ondes acoustiques.

Le point de départ des différents modèles théoriques est l'équation définie par l'intégrale de Helmholtz (§ 2.3.2). Dans le cas des ondes électromagnétiques (toutes les gammes d'ondes utilisées pour les radars, la région visible ou encore les rayons X), elle donne, en tout point de l'espace, l'expression du champ réfléchi par la surface. Pour la résoudre, deux voies sont envisagées : une approche numérique, développée au cours de ces dernières années, et une approche analytique, plus classique.

Les méthodes numériques cherchent à calculer exactement l'intégrale de Helmholtz en utilisant des algorithmes du type Monte Carlo et une description rigoureuse des lois de l'électromagnétisme. Différents algorithmes ont été développés pour décrire la réflexion de la lumière par un profil mono-dimensionnel [GAR 84] ou bi-dimensionnel [TSA 94][TRA 94]. Dans tous les cas, la surface réfléchissante est représentée en utilisant un échantillonnage très fin (typiquement le pas d'échantillonnage est dix fois plus petit que la longueur d'onde λ de

l'onde incidente). En outre, si cette surface est aléatoire, les calculs sont effectués sur un grand nombre de surfaces, identiques en terme de rugosité, pour aboutir aux propriétés statistiques du champ réfléchi.

Toutes ces raisons font que ces méthodes sont très gourmandes en temps de calcul et en taille mémoire. À titre d'exemple, une des toutes dernières méthodes de calcul, développée par Wagner [WAG 97], nécessite environ 30 Mo de mémoire pour une surface réfléchissante aléatoire dont le côté est égal à $9,15\lambda$ et le pas d'échantillonnage à $\lambda/7$. Sur une station de travail, le temps de calcul est de 12 secondes pour un échantillon et un angle d'éclairage. Ce temps de calcul doit être multiplié par le nombre total d'échantillons qui est généralement fixé à 100.

À l'heure actuelle, ces méthodes numériques sont donc inapplicables au cas des surfaces routières. En effet, il faut d'une part une mesure très fine du profil de ces surfaces, et d'autre part, du fait de la macrorugosité importante de ces surfaces, il faut que la taille de l'échantillon soit très grande devant la longueur d'onde λ . Ceci entraîne alors une taille mémoire et des temps de calcul trop grands.

Dans l'approche analytique, il existe trois grandes méthodes : la méthode des petites perturbations (ou «*small perturbation theory*»), l'approximation des petites pentes (ou «*small slope approximation*») et le «modèle de l'approximation de Kirchhoff»¹ (ou «modèle du plan tangent»). Toutes les trois conduisent à des formules analytiques plus ou moins simples. Le modèle de Kirchhoff est particulièrement prisé dans le domaine de la synthèse d'image, car il permet de décrire facilement les propriétés photométriques des matériaux en limitant les temps de calcul. Cependant, contrairement à l'approche numérique décrite ci-dessus, toutes ces méthodes sont limitées à un domaine de validité et ne sont pas utilisables pour toutes les rugosités de surfaces.

La méthode des petites perturbations, encore appelée méthode de Rayleigh-Fano, repose sur l'hypothèse que le champ d'altitude de la surface, ainsi que l'amplitude du champ électromagnétique réfléchi, peuvent se décomposer en série de Taylor fonction de la hauteur des ondulations de la surface (pour plus de détails, cf. [OGI 91], § 3 et [VOR 94], § 4). Il en découle que cette méthode n'est applicable qu'aux surfaces légèrement rugueuses dont l'amplitude des hauteurs $z(x, y)$ vérifie l'inégalité $k \cdot |z(x, y)| \ll 1$, où k est le module du vecteur d'onde. Dans cette théorie, le développement est limité au premier ou au second ordre et suivant les conditions aux limites retenues, elles donnent des formulations différentes.

L'approximation des petites pentes a vu le jour au cours de ces dernières années [VOR 85]. Les développements mathématiques qu'elle utilise sont très complexes. Mais, elle a l'avantage d'être indépendante de la longueur d'onde à condition que les pentes des ondulations de la surface soient plus petites que les angles d'incidence et de réflexion. À l'origine, ce modèle ne prend en compte que les réflexions simples, mais des modifications très récentes ont permis d'étendre son application aux réflexions multiples [VOR 96].

Le modèle de Kirchhoff est souvent utilisé, car il repose sur des lois simples de l'optique géométrique : la surface réfléchissante est remplacée en tout point par un plan tangent sur

1. Par la suite, pour éviter une certaine lourdeur, le «modèle de l'approximation de Kirchhoff» est désigné sous le nom de «modèle de Kirchhoff».

lequel se réfléchit l'onde. Cette méthode se limite aux surfaces pour lesquelles le rayon de courbure local est plus grand que la longueur d'onde. À l'origine, le modèle de Kirchhoff a été développé pour des surfaces parfaitement conductrices, c'est-à-dire pour un champ électromagnétique scalaire [AME 53][BEC 63], puis il a été étendu à tous les types de matériaux par une approche vectorielle des équations [HE 93][EMB 94]. L'ensemble de ces résultats est présenté dans le paragraphe 2.3.3.

Le modèle de Kirchhoff ne tient pas compte des effets de «masquage / ombrage» qui apparaissent pour les surfaces rugueuses. Suivant la rugosité de la surface et pour des angles d'éclairage et d'observation rasants, ces effets peuvent devenir importants et conduire à une surestimation de la lumière réfléchie dans la direction d'observation. Dans le paragraphe 2.3.4, ces effets sont étudiés et différents modèles analytiques sont présentés.

2.3.2 Intégrale de Helmholtz

L'intégrale de Helmholtz permet de calculer l'expression d'un champ en tout point d'une région de l'espace, en connaissant les valeurs de ce champ, ainsi que celles de ses dérivées premières, sur la surface enveloppe de cette région. La démonstration de cette formule est complexe et n'est pas ici présentée en détails. Pour une démonstration complète, le lecteur pourra se référer au chapitre 3.1 de [VOR 94].

Le point de départ de la démonstration est l'équation de propagation d'un champ scalaire $U(\mathbf{r})$ continu en tout point $M(\mathbf{r})$ de l'espace² :

$$\nabla^2 U(\mathbf{r}) + k^2 U(\mathbf{r}) = Q(\mathbf{r}) \quad (2-5)$$

∇ est l'opérateur nabla, $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$, et k est le nombre d'onde. La fonction $Q(\mathbf{r})$ permet de décrire les sources du champ U et elle tend vers 0 quand $|\mathbf{r}|$ tend vers l'infini.

La solution générale de l'équation (2-5) prend la forme suivante :

$$U(\mathbf{r}) = \int G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) Q(\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 = \int G(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) Q(\mathbf{r}_0) d\mathbf{r}_0 \quad (2-6)$$

dans laquelle $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$ est la fonction de Green. Cette fonction est définie en tout point $M(\mathbf{r})$, sauf pour les points $N(\mathbf{r}_0)$. Elle représente au point $M(\mathbf{r})$ une onde sphérique d'origine $N(\mathbf{r}_0)$ et elle est donnée par :

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}$$

2. Par la suite, les variables en gras représentent des vecteurs de l'espace $Oxyz$.

Si l'espace est maintenant limité à un volume V fini, dont la surface enveloppe Σ est fermée, alors le champ total $U(\mathbf{r})$ est la somme d'un champ incident $U_{inc}(\mathbf{r})$ et d'un champ réfléchi $U_{ref}(\mathbf{r})$, qui est le résultat de l'interaction de $U_{inc}(\mathbf{r})$ sur la surface Σ :

$$U(\mathbf{r}) = U_{inc}(\mathbf{r}) + U_{ref}(\mathbf{r}) \quad (2-7)$$

Pour pouvoir déterminer le champ total $U(\mathbf{r})$, il est alors nécessaire de connaître, en tout point $M(\mathbf{r})$ de l'espace, le champ réfléchi $U_{ref}(\mathbf{r})$. Cependant, Helmholtz a démontré que le champ total $U(\mathbf{r})$, qui vérifie l'équation (2-6), est donné exactement par la relation :

$$U(\mathbf{r}) = U_{inc}(\mathbf{r}) + \iint_{\Sigma} \left(U_{ref}(\mathbf{r}_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} U_{ref}(\mathbf{r}_0) \right) d\Sigma \quad (2-8)$$

Dans cette équation, l'intégration se fait sur la surface de réflexion Σ . \mathbf{n}_0 représente la normale intérieure au volume V au point $N(\mathbf{r}_0)$ de Σ . Ainsi, pour déterminer le champ total $U(\mathbf{r})$, il suffit uniquement de connaître $U_{ref}(\mathbf{r})$ et ses dérivées premières sur la surface enveloppe Σ .

L'équation (2-8) est la forme la plus générale de l'intégrale de Helmholtz et elle est applicable à de nombreux domaines. Dans le cas de l'électromagnétisme, le champ $U(\mathbf{r})$ représente une des composantes du champ électrique $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ ou du champ magnétique $\mathbf{B}(\mathbf{r})$. Dans ce cas, pour une onde monochromatique de longueur d'onde λ , k est alors le module du vecteur d'onde et $k = 2\pi / \lambda$.

Si l'intégrale de Helmholtz est appliquée à une surface réelle rugueuse, dont les dimensions sont finies, certaines hypothèses mathématiques ne sont plus vérifiées, car cette surface n'est pas fermée. Ce problème, rarement mentionné dans la littérature, peut être résolu à l'aide d'une hypothèse supplémentaire (cf. [OGI 91], §4.4.1, section a).

La solution la plus souvent utilisée consiste à prendre une surface réfléchissante fermée et à considérer que le champ électromagnétique total $\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r$ y est nul. Comme le montre la figure 2.3, le volume V est alors limité par une sphère Σ de rayon infini et par la surface réfléchissante qui est constituée d'une surface rugueuse S_{ref} , exposée au champ incident $\mathbf{E}_i(\mathbf{r})$, et d'une surface S_{masq} , qui n'est pas exposée.

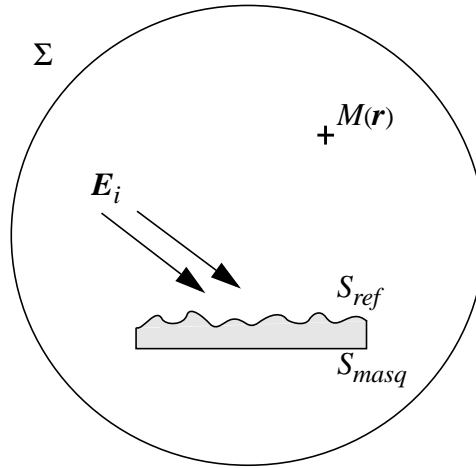


Figure 2.3 Réflexion d'une onde électromagnétique plane E_i sur une surface rugueuse S_{ref} [EMB 94].

Dans ces conditions, l'utilisation de l'équation (2-8) conduit à une somme de trois intégrales sur les surfaces S , S_{ref} et S_{masq} . En tenant compte du fait que l'intégrale sur Σ est égale au champ incident E_i et que celle sur S_{masq} est nulle, le champ réfléchi $E_r(\mathbf{r})$ par la surface rugueuse S_{ref} devient :

$$E_r(\mathbf{r}) = \iint_{S_{ref}} \left(\mathbf{E}(\mathbf{r}_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) - G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}_0} \mathbf{E}(\mathbf{r}_0) \right) dS_{ref} \quad (2-9)$$

L'utilisation de l'intégrale de Helmholtz a considérablement simplifié le problème du calcul du champ électrique réfléchi $E_r(\mathbf{r})$. En effet, il suffit maintenant de déterminer le champ total $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, ainsi que ses dérivées premières, sur la surface de réflexion S_{ref} . Cependant, le calcul des valeurs de $E_r(\mathbf{r})$ par l'intermédiaire de l'intégrale (2-9) n'est pas évident. Dans les paragraphes suivants, la méthode présentée pour résoudre cette équation fait partie des approches analytiques (§2.3.1). Elle est basée sur une hypothèse simplificatrice et constitue le modèle de Kirchhoff.

2.3.3 Modèle de l'approximation de Kirchhoff

2.3.3.1 Approximation de Kirchhoff ou du plan tangent

L'approximation de Kirchhoff permet de remplacer, localement et en tout point, la surface de réflexion S_{ref} par son plan tangent. Cette approximation suppose alors que le champ réfléchi $E_r(\mathbf{r})$ et ses dérivées premières sont donnés par leurs valeurs obtenues sur ce plan tangent (fig. 2.4).

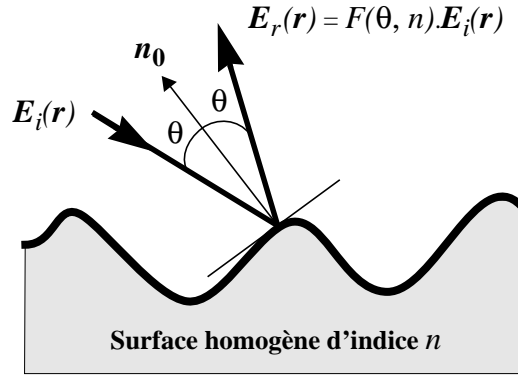


Figure 2.4 Approximation du plan tangent.

En chaque point de la surface, un plan tangent est donc défini avec son système local d'axes. Sur ce plan, la réflexion est du type spéculaire (§ 1.2.1.1). Le coefficient de proportionnalité entre le champ incident et le champ réfléchi est donné par le facteur de Fresnel (1-7). Ce coefficient dépend de la polarisation du champ incident, de l'indice de réfraction du matériau de la surface et de l'angle local d'incidence θ . Pour une surface rugueuse, cet angle θ varie continûment le long de la surface en fonction du gradient local de cette surface.

Le champ incident $E_i(\mathbf{r})$ est caractérisé par un vecteur d'onde \mathbf{k}_i et un vecteur de polarisation \mathbf{P}_i de telle sorte que son expression est :

$$E_i(\mathbf{r}) = \mathbf{P}_i(\mathbf{r})e^{j(\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$$

De même, au champ réfléchi $E_r(\mathbf{r})$ est associé un vecteur d'onde \mathbf{k}_r et un vecteur de polarisation \mathbf{P}_r .

À l'aide de l'approximation du plan tangent, l'intégrale de Helmholtz (2-9) peut être calculée et le champ électrique réfléchi $E_r(\mathbf{r})$ est alors donné par ([EMB 94], eq. 4.14) :

$$E_r(\mathbf{r}) = j \frac{e^{j(kR_0 - \omega t)}}{4\pi R_0} \iint_{S_{ref}} e^{j(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}')} \{ (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_0) \cdot \mathbf{P}_r(\mathbf{r}') - ((\mathbf{w} \cdot \mathbf{n}_0) \cdot \mathbf{P}_i) \} dS_{ref} \quad (2-10)$$

où $R_0 = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$ est la distance entre un point particulier de la surface et le point $M(\mathbf{r})$. Les vecteurs \mathbf{v} et \mathbf{w} sont définis d'après les vecteurs \mathbf{k}_i et \mathbf{k}_r : $\mathbf{v} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r$, $\mathbf{w} = \mathbf{k}_i + \mathbf{k}_r$. \mathbf{n}_0 est ici la normale du plan local tangent à la surface (fig. 2.4).

L'équation précédente constitue l'expression vectorielle de l'intégrale de Helmholtz pour une surface de réflexion quelconque. Elle est valable si la distance R_0 entre la surface et le point d'observation $M(\mathbf{r})$ est grande devant la longueur d'onde λ . En outre, il faut également que le rayon de courbure local de la surface soit plus grand que λ . Cette restriction fixe en partie le domaine de validité du modèle de Kirchhoff, qui sera détaillé au paragraphe 2.3.3.4.

Dans l'intégrale (2-10), le terme contenant $\mathbf{P}_r(\mathbf{r}')$ est difficile à déterminer, car il varie sur toute la surface. Cependant, cette surface peut être vue comme un ensemble de petites facettes planes de dimensions supérieures à la longueur d'onde. Dans ce cas, seules les facettes orientées spéculairement contribuent d'une manière significative au champ diffusé dans la direction \mathbf{k}_r . $\mathbf{P}_r(\mathbf{r}')$ est alors remplacé par le vecteur de polarisation local $\mathbf{P}(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_r)$ des facettes orientées spéculairement.

D'après [EMB 94], eq. 4.15, l'équation (2-10) devient :

$$\mathbf{E}_r(\mathbf{r}) = j \frac{e^{j(kR_0 - \omega t)}}{4\pi R_0} \left\{ \mathbf{P}(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_r) \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{v_z} \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y e^{j(\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}')} dx' dy' + \varepsilon(\mathbf{r}) \right\} \quad (2-11)$$

où X et Y sont les dimensions de la surface de réflexion.

Le terme $\varepsilon(\mathbf{r})$ permet de tenir compte des «effets de bords» dus à la taille limitée de la surface réfléchissante [BEC 63]. Ogilvy a montré que $\varepsilon(\mathbf{r})$ ne donne pas de contribution au champ réfléchi s'il peut être considéré comme non stochastique ([OGI 91], §4.1.2). Par la suite, cette hypothèse est retenue et les effets de bords sont donc négligés.

2.3.3.2 Application à une surface rugueuse quelconque

a. Description de la surface

Pour déterminer le champ électrique réfléchi par la surface rugueuse à l'aide de l'intégrale (2-10), il est alors nécessaire de connaître parfaitement le profil de la surface. Ceci n'est possible que dans des cas bien précis et Beckmann ([BEC 63], §4) propose des résultats de calculs pour des surfaces décrites par des fonctions analytiques. Dans les autres cas, des informations sur des échelles de longueurs comparables à la longueur d'onde λ sont suffisantes et des méthodes statistiques sont alors utilisées pour décrire les surfaces.

La hauteur z de la surface au point de coordonnées (x, y) est définie comme une variable aléatoire dépendant des coordonnées de la surface : $z = \zeta(x, y)$. Cette variable ζ est définie par une loi de probabilité $p(z)$. Pour simplifier la suite des calculs, les surfaces sont supposées stationnaires et isotropes ; la distribution des hauteurs $p(z)$ est indépendante de la position du point considéré sur la surface et elle est identique dans toutes les directions du plan Oxy .

La surface générée par la variable aléatoire z est caractérisée par différents moments comme sa moyenne μ , son écart-type σ et sa fonction caractéristique χ . Cette dernière est le résultat de la transformée de Fourier de la loi de probabilité $p(z)$ de ζ :

$$\chi(v_z) = \langle e^{-jv_z \zeta} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} p(z) e^{-jv_z z} dz \quad (2-12)$$

Pour spécifier complètement la surface, le coefficient de corrélation B entre les hauteurs z et z' de deux points \mathbf{r} et \mathbf{r}' distants de la longueur τ doit être explicité. Pour $\tau = 0$, les deux hauteurs z et z' sont pleinement corrélées donc $B = 1$. Par contre, quand τ devient grand, z et z' deviennent indépendantes et B tend vers 0. La probabilité correspondante $p_2(z, z', \tau)$ pour que deux points espacés de la distance τ aient les altitudes z et z' peut être définie et sa fonction caractéristique calculée :

$$\chi_2(v_z, -v_z, \tau) = \langle e^{-jv_z(\xi - \xi')} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_2(z, z', \tau) e^{-jv_z(z - z')} dz dz' \quad (2-13)$$

La surface réfléchissante étant définie par une variable aléatoire, le champ électrique \mathbf{E}_r et son intensité I_r sont aussi des variables aléatoires. Dans les paragraphes suivants, la moyenne et la variance de l'intensité du champ électrique \mathbf{E}_r sont calculées. Ceci permet de déterminer les intensités cohérentes et incohérentes réfléchies par la surface rugueuse.

b. L'intensité cohérente

L'intensité cohérente I_{coh} est déterminée par l'amplitude moyenne du champ électrique réfléchi \mathbf{E}_r . Dans ces conditions, en reprenant l'intégrale de l'équation (2-11) et en utilisant la définition de la fonction caractéristique χ de la surface (2-12), l'intensité cohérente s'écrit :

$$I_{coh} = I_0 \cdot |\chi(v_z)|^2 \quad (2-14)$$

L'intensité I_0 est ici l'intensité diffractée à l'infini, pour une onde plane monochromatique, par une surface lisse de même étendue géométrique que la surface rugueuse :

$$I_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{S^2}{(4\pi R_0)^2} \cdot A^2 \cdot \text{sinc}^2(v_x X) \cdot \text{sinc}^2(v_y Y) \quad (2-15)$$

Dans cette équation, v_x , v_y et v_z sont les composantes du vecteur \mathbf{v} , $\mathbf{v} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r$, S est l'aire de la surface de réflexion, $S = 4XY$, et A^2 est le module au carré de l'amplitude du champ électrique incident \mathbf{E}_i . La fonction sinus cardinale $\text{sinc}(x)$ est égale à $\sin(x)/x$.

Comme les dimensions X et Y de la surface sont très grandes devant la longueur d'onde λ , et que \mathbf{v} est proportionnel à l'inverse de λ , l'intensité cohérente I_{coh} ne prend des valeurs significatives uniquement quand $v_x X = v_y Y = 0$, ou encore quand $v_x = v_y = 0$. Cette égalité n'est vérifiée que dans la direction de spécularité, c'est-à-dire si les vecteurs \mathbf{k}_i et \mathbf{k}_r sont dans le même plan et symétriques par rapport à la normale à la surface³.

L'intensité cohérente dépend de la rugosité par l'intermédiaire de la fonction caractéristique $\chi(v_z)$ de la surface réfléchissante.

3. Cette normale est la normale du plan moyen de la surface rugueuse.

c. L'intensité incohérente

L'intensité incohérente I_{inc} est donnée par la variance du champ électrique \mathbf{E}_r réfléchi par la surface rugueuse (l'astérisque représente le complexe conjugué) :

$$I_{inc} = \langle \mathbf{E}_r(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{E}_r^*(\mathbf{r}) \rangle - \langle \mathbf{E}_r(\mathbf{r}) \rangle \langle \mathbf{E}_r^*(\mathbf{r}) \rangle$$

En partant à nouveau de l'intégrale de l'expression (2-11), l'intensité incohérente I_{inc} est alors proportionnelle à la quadruple intégrale K suivante :

$$K = \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y \langle e^{jv_z(\xi - \xi')} \rangle e^{j(v_x(x - x') + v_y(y - y'))} dx dy dx' dy'$$

Le changement de variable proposé par Beckmann ([BEC 63], §5.2) permet d'obtenir une formulation plus générale de K . Elle ne fait intervenir que les fonctions caractéristiques $\chi(v_z)$ et $\chi_2(v_z, -v_z, \tau)$ de la surface, ainsi que la fonction de Bessel du premier ordre $J_0(x)$:

$$K = 2\pi S \cdot K' = 2\pi S \cdot \int_0^\infty J_0(v_{xy}\tau) [\chi_2(v_z, -v_z, \tau) - \chi(v_z)\chi^*(v_z)] \tau d\tau \quad (2-16)$$

où $v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

Finalement, en prenant en compte tous les facteurs de l'équation (2-11), l'intensité incohérente I_{inc} est alors donnée par⁴ :

$$I_{inc} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot A^2 \cdot \frac{\pi S}{(4\pi R_0)^2} \cdot F \cdot \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{v_z} \right)^2 \cdot K' \quad (2-17)$$

À nouveau, le profil de la surface apparaît dans l'expression de l'intensité incohérente I_{inc} par l'intermédiaire des fonctions caractéristiques χ et χ_2 utilisées dans l'intégrale (2-16).

2.3.3.3 Application à une «surface à profil gaussien»

Les expressions (2-14) et (2-16) des intensités cohérentes et incohérentes réfléchies par une surface rugueuse sont valables pour tout type de profil. Cependant, ces équations sont sou-

4. Ici, l'intensité incohérente calculée est celle d'une onde électromagnétique plane et monochromatique qui se réfléchit sur une surface rugueuse. Cela suppose que les champs électriques et magnétiques de l'onde sont pris en compte. L'expression du champ magnétique, qui n'a pas été développée plus haut, s'obtient par un raisonnement similaire à celui suivi pour le champ électrique. Pour plus de détails, le lecteur se reportera à [EMB 94], §4.2.3.

vent appliquées au cas d'une «surface à profil gaussien», car les expressions obtenues sont beaucoup plus simples.

Pour des surfaces caractérisées par une fonction de corrélation en exponentielle décroissante, le lecteur pourra se référer à [CHU 91]. Pour des surfaces fractales voir les articles de [LIN 95] et [MEN 97].

a. Description de la surface

Pour les «surfaces à profil gaussien», la variable aléatoire ζ suit une loi de distribution normale $N(0, \sigma)$ centrée sur le plan moyen de la surface ($\mu = 0$) et d'écart-type σ . La distribution $p(z)$ est donc :

$$p(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2} \quad (2-18)$$

De même, le coefficient de corrélation B est défini par une fonction gaussienne :

$$B(\tau) = e^{-\tau^2/T^2} \quad (2-19)$$

où $\tau^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ et T est la longueur de corrélation de la surface. Plus la longueur T est grande, plus la surface est corrélée et plus ses ondulations sont lentes et douces.

À l'aide des hypothèses précédentes et grâce aux propriétés de la fonction gaussienne, les fonctions caractéristiques $\chi(v_z)$ et $\chi_2(v_z, -v_z, \tau)$ peuvent être calculées et elles prennent les formes analytiques suivantes :

$$\begin{aligned} \chi(v_z) &= e^{-v_z^2 \sigma^2 / 2} \\ \chi_2(v_z, -v_z, \tau) &= e^{-v_z^2 \sigma^2 (1 - B(\tau))} \end{aligned} \quad (2-20)$$

b. Les intensités cohérentes et incohérentes

En insérant l'expression (2-20) de $\chi(v_z)$ dans l'équation (2-14), l'intensité cohérente I_{coh} réfléchi par la surface s'écrit finalement :

$$I_{coh} = I_0 \cdot e^{-g} \quad (2-21)$$

I_0 est donné par l'équation (2-15) et le nouveau paramètre g est défini par :

$$g = (v_z \sigma)^2 = \left[\frac{2\pi\sigma}{\lambda} (\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)) \right]^2 \quad (2-22)$$

L'intensité cohérente I_{coh} réfléchiée par une surface rugueuse est donc égale à l'intensité I_0 réfléchiée par une surface lisse (2-15), pondérée par une exponentielle décroissante d'argument g . En dehors de la direction de spécularité, cette intensité cohérente est nulle (§ 2.3.3.2).

Le calcul de l'intensité incohérente I_{inc} n'est pas immédiat car l'intégrale (2-16) ne peut pas être calculée analytiquement. Dans [BEC 63] ou [OGI 91], des développements mathématiques sont proposés pour transformer cette intégrale en une somme infinie. L'intensité incohérente I_{inc} s'écrit sous la forme :

$$I_{inc} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot A^2 \cdot \frac{\pi S}{(4\pi R_0)^2} \cdot F \cdot \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{v_z} \right)^2 \cdot T^2 \cdot e^{-g} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m \cdot m!} e^{-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4m}} \quad (2-23)$$

Avec les équations (2-21) et (2-23) déterminées pour des «surfaces à profil gaussien», il apparaît que les intensités cohérentes et incohérentes dépendent :

- de l'écart-type des hauteurs σ ,
- du module du vecteur d'onde incident $k = 2\pi / \lambda$,
- des angles d'incidence θ_i et d'observation θ_r et ϕ_r .

L'intensité incohérente I_{inc} dépend également de la longueur de corrélation T . Les corrélations de la surface sont donc à l'origine du champ électrique réfléchi en dehors des directions proches de la direction de spécularité. Ceci n'est pas surprenant, car T détermine la valeur des pentes de la surface qui sont proportionnelles au rapport T sur σ .

c. Remarques

L'importance du paramètre g (2-22), qui apparaît dans les expressions de I_{coh} et I_{inc} , est maintenant apparente : il détermine les amplitudes relatives des intensités cohérentes et incohérentes. Pour les directions de réflexions proches de la direction de spécularité $\theta_i \sim \theta_r$, g est relié au critère de Rayleigh R_a (§ 2.1) par la relation : $R_a = \sqrt{g}$. Dans ces conditions, g peut être interprété comme une mesure du carré de la moyenne de la différence de phase entre deux ondes réfléchies par la surface. Si l'amplitude des irrégularités de cette surface augmente par rapport à la longueur d'onde λ , g prend des valeurs grandes devant 1. La cohérence de la lumière réfléchiée diminue et I_{coh} tend rapidement vers 0. Pour les surfaces très rugueuses, le champ électrique diffusé devient alors totalement incohérent.

En fonction de la valeur de g , trois catégories de surfaces sont alors considérées :

- les surfaces peu rugueuses, $g \ll 1$,
- les surfaces de rugosité modérée, $g \sim 1$,
- les surfaces très rugueuses, $g \gg 1$.

Dans cette classification, la rugosité de la surface exprimée par l'intermédiaire de g est interprétée comme la présence et l'importance de l'intensité cohérente réfléchie. Pour les surfaces peu rugueuses, l'intensité cohérente est plus importante que l'intensité incohérente. À l'inverse, pour les surfaces très rugueuses, seule l'intensité incohérente est présente.

2.3.3.4 Domaine de validité du modèle de Kirchhoff

Le modèle de Kirchhoff est exact pour les surfaces infinies, lisses et planes. Mais, pour les surfaces rugueuses et de dimensions finies, des erreurs apparaissent. Par un raisonnement théorique, il est très difficile de déterminer les limites d'utilisation du modèle de Kirchhoff. Aussi, la plupart des résultats suivants ont été obtenus par comparaison entre des simulations numériques et les prévisions du modèle.

Le fait de considérer une surface réfléchissante de dimension finie entraîne des erreurs, car des «effets de bords» apparaissent. Or, ceux-ci sont négligés par la théorie. Il n'existe pas de valeurs précises de la taille minimum que doit avoir la surface. Mais des simulations montrent que les erreurs diminuent quand la taille de la surface augmente (voir [JEB 82]).

La rugosité de la surface joue également un rôle important dans la précision du modèle de Kirchhoff. Les erreurs engendrées par la rugosité se regroupent en deux ensembles : les erreurs «locales» et les erreurs «globales». Les erreurs «locales» se produisent en chaque point de la surface et sont liées à la courbure locale de la surface. Dans ce cas, c'est la validité de l'approximation du plan tangent (§2.3.3.1) qui intervient. À l'inverse, les erreurs «globales» sont dues à des effets de grande échelle, en particulier les réflexions multiples et les effets de «masquage / ombrage», qui ne sont pas pris en compte dans le modèle de Kirchhoff.

Une bonne idée de la précision du modèle de Kirchhoff a été donnée par le travail de Thorsos [THO 88], puis confirmée par Soto-Crespo et Nieto-Vesperinas [SOT 89]. Ils ont montré que les deux paramètres les plus importants sont :

- le rapport T/λ ,
- le rapport $r = \sigma/T$.

Plus le rapport T/λ est grand devant 1, plus le modèle de Kirchhoff est précis. Le rapport $r = \sigma/T$, appelé par la suite rugosité de la surface, est relié au gradient de la surface. Plus ses valeurs sont petites devant 1, c'est-à-dire plus les pentes de la surface sont douces, meilleures sont les prévisions du modèle.

L'angle d'éclairage θ_i a aussi une influence non négligeable sur la qualité des prévisions, qui se dégradent pour les incidences rasantes. Soto-Crespo [SOT 89] donne une relation qui restreint le domaine de validité en fonction de θ_i . Pour que le modèle reste valable, la condition suivante doit être vérifiée :

$$\frac{\cos(\theta_i)}{r} > 5$$

Toutes ces remarques ne sont pas surprenantes, car d'une part la longueur de corrélation T affecte le rayon local de courbure de la surface et d'autre part, l'écart-type des hauteurs σ et l'angle d'éclairage θ_i déterminent la rugosité relative de la surface (§2.1). Le paramètre g n'apparaît pas dans le domaine de validité, car c'est uniquement un paramètre du modèle de Kirchhoff. Si les conditions sur T et σ sont vérifiées, alors le modèle de Kirchhoff est utilisable, et suivant la valeur de g , la lumière réfléchiée par la surface sera principalement cohérente (surface dite peu rugueuse) ou incohérente (surface dite très rugueuse).

Des comparaisons entre le modèle de Kirchhoff et des mesures expérimentales ont abouti à des résultats similaires (voir par exemple O'Donnell et Mendez [ODO 87]). Elles ont également mis en évidence l'importance de l'angle d'observation θ_r . En effet, en fonction de cet angle (et de la rugosité), les réflexions multiples et les effets de «masquage / ombrage» sont plus ou moins importants.

2.3.4 Les effets de «masquage / ombrage»

2.3.4.1 Description du phénomène

Dès que la surface de réflexion est rugueuse, des zones de cette surface ne sont plus éclairées ou ne sont plus vues par l'observateur. Ces phénomènes sont appelés les effets de «masquage / ombrage»⁵. Le terme «masquage» est utilisé pour les parties de la surface qui ne sont pas vues par l'observateur. Inversement, «ombrage» désigne la surface qui n'a pas reçu directement de lumière de la source (fig. 2.5).

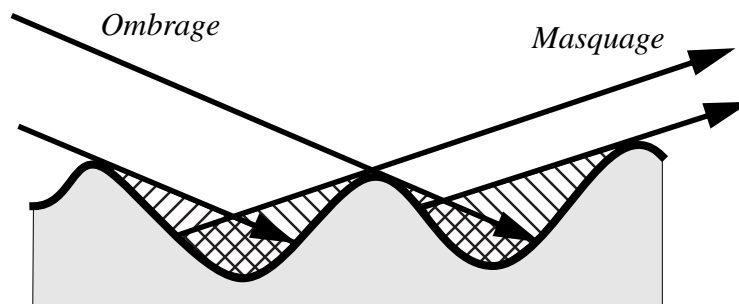


Figure 2.5 Représentation des phénomènes de «masquage / ombrage».

Les phénomènes de «masquage / ombrage» sont étudiés depuis la fin des années 1960. Beckmann [BEC 63] a montré que la rugosité de la surface a pour effet de réduire l'aire de la surface réfléchissante, donc de diminuer la composante diffuse directionnelle de la lumière

5. En anglais les effets de «masquage» sont appelés «*self-masking*» ou «*masking*» et les effets d'«ombrage», «*self-shadowing*» ou «*shadowing*». Les effets combinés de «masquage / ombrage» sont désignés par le terme «*bistatic shadowing*»

réfléchi. Il a alors modélisé cette atténuation par un coefficient correcteur, noté C , qui représente la fraction de la surface visible par l'observateur et éclairée directement par la source. Le coefficient C dépend des directions d'éclairage et d'observation, et il doit respecter le principe de réciprocité de Helmholtz :

$$C(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = C(\theta_r, \phi_r; \theta_i, \phi_i)$$

Beckmann a démontré que le coefficient C peut être décomposé en un produit de deux coefficients S identiques. Cependant, dans le plan d'éclairage et d'après les définitions des angles de la figure 1.4, il faut distinguer le plan de rétrodiffusion pour lequel $|\phi_i - \phi_r| = 0^\circ$ et le plan de spécularité défini par $|\phi_i - \phi_r| = 180^\circ$.

Finalement, Beckmann décompose le coefficient de «masquage / ombrage» C de la façon suivante :

$$C(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \begin{cases} S(\theta_i) & \text{si } \theta_i \geq \theta_r \\ S(\theta_r) & \text{si } \theta_i \leq \theta_r \end{cases} \text{ et si } |\phi_i - \phi_r| = 0^\circ$$

$$S(\theta_i) \cdot S(\theta_r) \text{ ailleurs} \quad (2-24)$$

Wagner [WAG 67] propose une autre définition pour C , qui diffère du modèle de Beckmann uniquement pour les directions d'observation telles que $|\phi_i - \phi_r| \neq 0^\circ$. Dans le cas particulier des «surfaces à profil gaussien», il écrit le coefficient C sous la forme :

$$C(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{(\text{erf}(v_i) + \text{erf}(v_r))(1 - e^{-(F(v_i) + F(v_r))})}{2(F(v_i) + F(v_r))}$$

$$\text{avec } \begin{cases} F(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{3}\pi x} e^{-9x^2/8} + \frac{1}{\sqrt{\pi}x} e^{-x^2} - \text{erfc}(x) \right) \\ v = \frac{1}{2r \tan(\theta)} \end{cases} \quad (2-25)$$

La nouvelle variable v est reliée à la rugosité r et à l'angle θ , v_i correspondant au cas où l'angle θ est égal à θ_i , v_r à celui pour lequel $\theta = \theta_r$.

$\text{erfc}(x)$ est la fonction erreur complémentaire, $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$, qui a pour valeurs remarquables : $\text{erfc}(0) = 1$ et $\text{erfc}(\infty) = 0$.

À la différence de la définition de Beckmann, le coefficient C ne peut pas être décomposé en un produit de deux coefficients identiques S dépendant respectivement de θ_i et θ_r . Cependant, le principe de réciprocité est respecté si les angles θ_i et θ_r sont intervertis.

Que ce soit pour le modèle de Beckmann ou de Wagner, le coefficient C présente une discontinuité quand la direction d'observation se rapproche du plan de rétrodiffusion (autre-

ment dit, quand $|\phi_i - \phi_r|$ tend vers 0°). À l'heure actuelle, il semble qu'aucun modèle ne résout ce problème.

Le nouveau coefficient S défini dans l'équation (2-24) est appelé coefficient de masquage. D'un point de vue géométrique, S est le rapport de l'aire de la surface éclairée (ou vue) sur l'aire totale de cette surface. D'un point de vue statistique, S est la probabilité pour qu'un point de la surface, choisi arbitrairement, soit illuminé (ou vu). Le coefficient de masquage S est une fonction monotone décroissante avec l'angle θ , égale à 1 pour une incidence normale ($\theta = 0^\circ$, toute la surface est éclairée) et qui tend vers 0 pour les incidences rasantes (θ tend vers 90°). En outre, cette fonction dépend de la rugosité r de la surface, car les effets de «masquage / ombrage» sont plus marqués pour les surfaces très rugueuses.

2.3.4.2 Le coefficient de masquage

Après avoir proposé une définition pour le coefficient de masquage, Beckmann a développé un modèle pour obtenir une expression analytique de $S(\theta)$. Comme pour le modèle de Kirchhoff, il a supposé que l'altitude en un point de la surface est une variable aléatoire. Le profil de la surface est alors caractérisé par une distribution des altitudes et une fonction de corrélation. Dans un premier temps, les calculs sont développés dans le cas général, puis appliqués au cas d'une distribution normale des hauteurs $N(0, \sigma)$ et d'une fonction de corrélation gaussienne B (voir les définitions 2-18 et 2-19). Il obtient alors une expression du coefficient de masquage faisant intervenir uniquement l'angle θ et la rugosité r de la surface :

$$S_{\text{Beck}}(\theta, r) = \exp\left(-\frac{1}{4}\tan(\theta)\text{erfc}(v)\right) \quad (2-26)$$

Quelques mois plus tard, Brockelman et Hagfors [BRO 66] ont obtenu des valeurs «expérimentales» du coefficient de masquage S . Ils ont calculé numériquement les valeurs de S en utilisant des profils à deux dimensions de surfaces gaussiennes. En confrontant leurs résultats avec les prédictions du modèle de Beckmann, ils ont mis en évidence des écarts importants et des erreurs dans le raisonnement de Beckmann.

Par la suite, en reprenant les idées de Beckmann et les remarques de Brockelman et Hagfors, Wagner [WAG 67] puis Smith [SMI 67] ont proposé d'autres formulations pour S . Ces deux modèles sont très proches au niveau des hypothèses, mais différents quant à la conduite des calculs. Smith définit S par l'expression suivante :

$$S_{\text{Smith}}(\theta, r) = \frac{1 - \frac{1}{2}\text{erfc}(v)}{\Lambda(v) + 1} \quad (2-27)$$

où la fonction $\Lambda(x)$ est donnée par : $\Lambda(x) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{\pi}x}e^{-x^2} - \text{erfc}(x)\right)$.

Wagner définit S de deux manières : la première a une expression assez simple, semblable à celle donnée par Smith, et la seconde est beaucoup plus compliquée, mais également plus précise. Dans la suite, c'est cette seconde équation qui est utilisée :

$$S_{\text{Wag}}(\theta, r) = \frac{(1 + \text{erf}(v))(1 - e^{-F(v)})}{2F(v)} \quad (2-28)$$

la fonction $F(x)$ étant celle de l'équation (2-25).

Embrechts [EMB 94] a suivi une démarche différente dont le but était d'obtenir une expression directement utilisable dans le domaine de la simulation d'éclairage, c'est-à-dire une expression demandant peu de temps de calcul. Il a donc cherché une formulation analytique simple et réaliste pour S . La seule contrainte fixée est que S dépende uniquement de l'angle d'éclairage et de la rugosité r de la surface :

$$S_{\text{Emb}}(\theta, r) = \frac{\frac{1}{r \tan(\theta)}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{r \tan(\theta)}\right)^2}} \quad (2-29)$$

Contrairement au modèle de Kirchhoff, les expressions des coefficients de masquage S sont valables pour toutes les valeurs de la rugosité.

2.3.4.3 Comparaison entre les modèles de masquage et les modèles de «masquage / ombrage»

Dans une première partie, les modèles théoriques du coefficient de masquage S sont comparés aux données «expérimentales» de Brockelman et Hagfors [BRO 66]. Les différentes valeurs de rugosité sont celles choisies par Brockelman, soit $r = \{1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,1\}$ avec $\sigma = 1$ et $T = \{1 ; 2 ; 4 ; 10\}$. Les unités de σ et T sont arbitraires, car seul le rapport $r = \sigma / T$ apparaît dans les différentes équations.

Les comportements attendus du coefficient de masquage sont retrouvés avec les courbes de la figure 2.6. $S(\theta)$ décroît avec l'angle θ et des effets de masquage sont plus importants pour les rugosités r les plus grandes. Ces courbes peuvent également être modélisées par deux droites : l'une horizontale qui correspond au plateau $S(\theta) = 1$, l'autre de pente variable suivant la rugosité et qui passe par le point $S(90^\circ) = 0$.

Au point d'intersection de ces deux droites correspond un angle de coupure θ_c . Dans l'ordre décroissant de la rugosité, les valeurs de θ_c sont égales à 18° , 45° , 64° et 78° . Pour les valeurs de θ inférieures à θ_c , S peut être considéré constant et égale à 1. Puis, pour les angles θ supérieurs à θ_c , $S(\theta)$ décroît linéairement avec une pente plus importante pour les surfaces de faible rugosité.

Les courbes de la figure 2.6 montrent clairement que le modèle de Beckmann est très mauvais pour les fortes rugosités ($r = 1$ et $r = 0,5$). Dans les autres cas, il a tendance à surestimer les effets du masquage pour les angles rasants. Cependant, les écarts entre ce modèle et les valeurs expérimentales diminuent rapidement quand la rugosité décroît. Les modèles de Smith et de Wagner donnent des résultats similaires et ils restent très proches des valeurs expérimentales de Brockelman. Quel que soit l'angle θ et la rugosité de la surface, les écarts avec ces valeurs sont toujours inférieures à 5%. La comparaison entre les trois modèles met en avant ceux de Wagner et de Smith. Mais, le modèle de Smith a un petit avantage sur celui de Wagner, car son expression mathématique est moins compliquée et donc moins onéreuse en temps de calcul.

Les modèles précédents de Beckmann, Wagner ou Smith s'efforcent de résoudre de manière rigoureuse les problèmes des effets de masquage. Du coup, leurs formulations sont complexes. Les courbes de la figure 2.6 montrent que le modèle d'Embrechts donne de moins bons résultats que celui de Smith avec des écarts pouvant aller jusqu'à 20%. Le modèle d'Embrechts a tendance à surestimer systématiquement S pour les petits angles d'éclairage et à sous-estimer S pour les angles rasants. Là encore, plus la rugosité est petite, meilleurs sont les résultats.

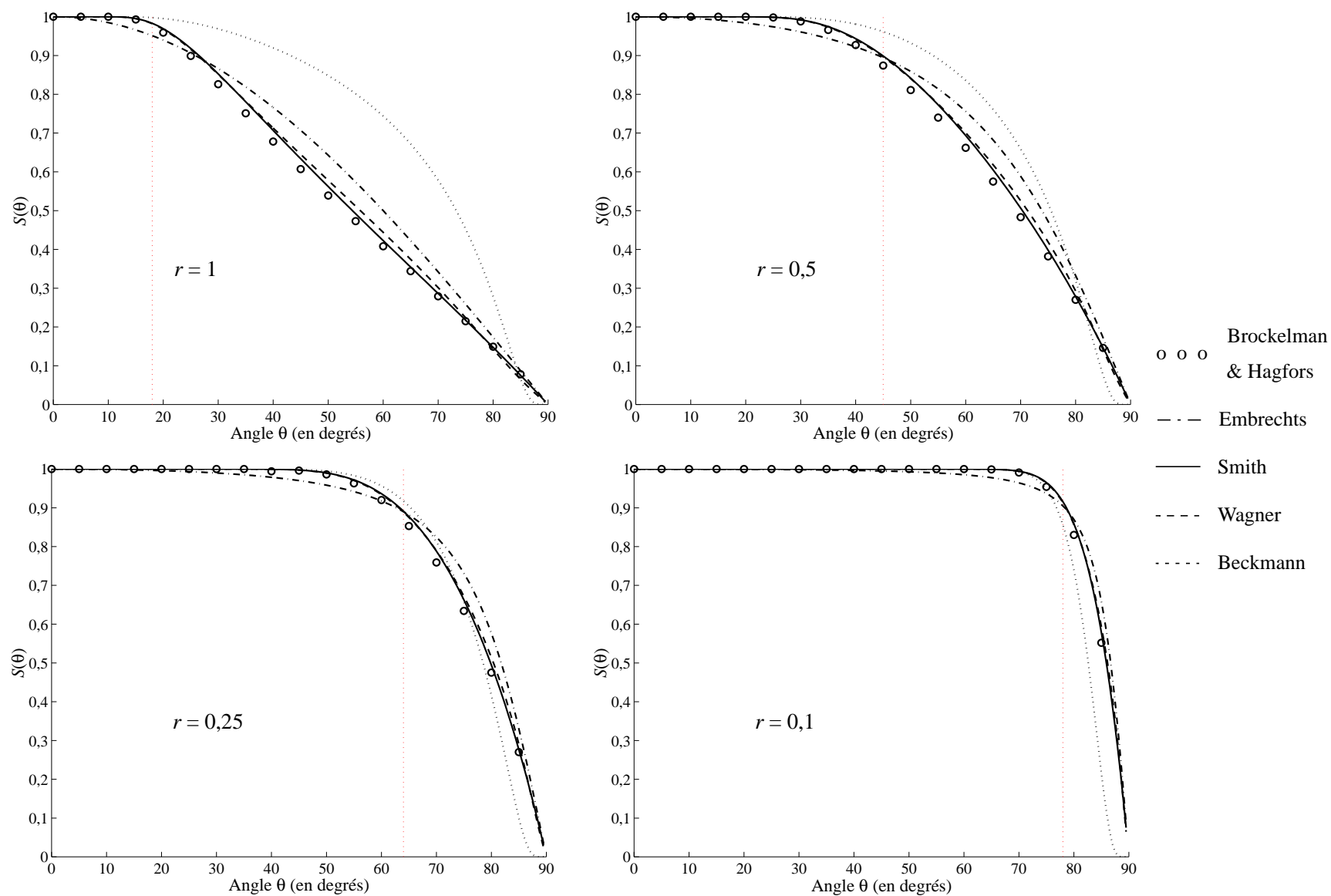


Figure 2.6 Coefficient de masquage S en fonction de l'angle θ et de la rugosité $r = \{1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,1\}$.

Dans cette seconde partie, le coefficient de «masquage / ombrage» C est représenté pour deux angles d'incidence θ_i et deux rugosités r ($r = 0,25$ et $r = 0,1$). Le coefficient C est tracé dans le plan d'éclairage, les valeurs négatives de θ_r correspondant à $\phi_r = 0^\circ$ et les valeurs positives à $\phi_r = 180^\circ$. Brockelman et Hagfors n'ont pas calculé numériquement les valeurs de C . Celles représentées ont été obtenues à partir de leurs résultats pour le coefficient de masquage S et en utilisant la définition (2-24) du coefficient C .

Comme dans le cas du coefficient de masquage, le modèle de Smith est très proche des données de Brockelman (fig. 2.7). Ce résultat n'est pas surprenant, car dans les deux cas, le calcul de C repose sur les mêmes équations (2-24) faisant intervenir le coefficient de masquage S . Or, le modèle de Smith est déjà très satisfaisant pour décrire ce coefficient S . Cependant, les écarts entre les valeurs expérimentales et le modèle de Smith sont plus importants et varient avec la rugosité de la surface. Pour $\theta_i = 60^\circ$, ils sont voisins de 5%, alors que pour $\theta_i = 80^\circ$, ils sont de l'ordre de 10%. Les prévisions du modèle de Wagner suivent le même comportement. Par rapport à celui de Smith, le modèle de Wagner sous-estime ou surestime le coefficient C . Mais, les écarts entre les deux modèles restent toujours très faibles.

Les résultats présentés sur les figures 2.6 et 2.7 mettent en valeur le modèle de Smith. Par la suite, pour décrire les effets de «masquage / ombrage», c'est donc ce modèle qui sera choisi en utilisant les équations (2-24) et (2-27).

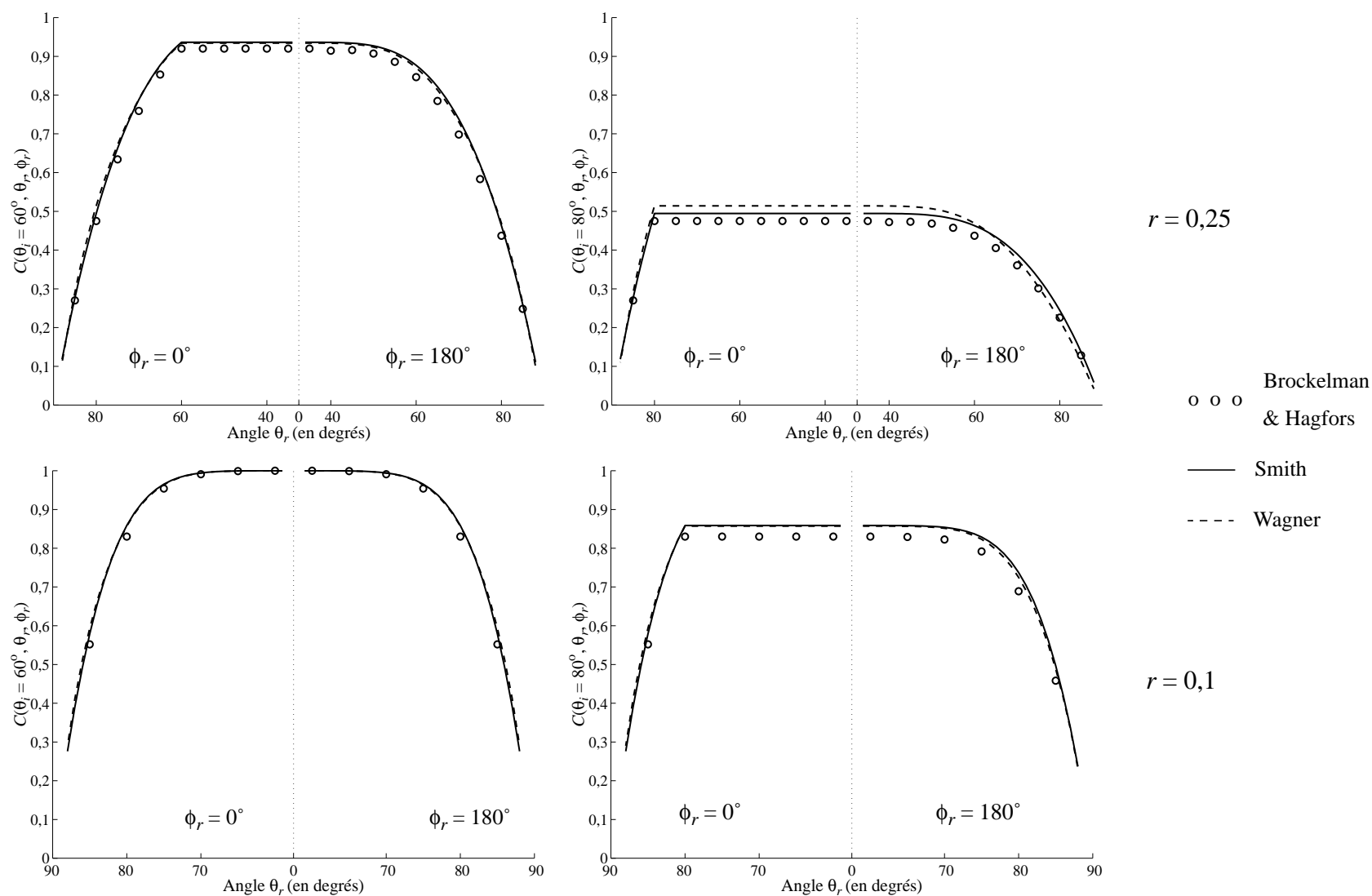


Figure 2.7 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction de l'angle d'observation θ_r , de l'angle d'incidence θ_i et de la rugosité r .

2.3.5 Le modèle complet de réflexion

Dans ce paragraphe, un récapitulatif des résultats précédents est donné. En prévision de la comparaison du modèle avec des données expérimentales, les résultats présentés sont ceux du coefficient de luminance q qui est la somme de trois composantes (§2.2, équation (2-5)).

Pour avoir des formules analytiques plus faciles à manipuler, la surface rugueuse est définie par une loi de distribution des hauteurs normale et une fonction d'autocorrélation gaussienne respectivement caractérisées par un écart-type σ et une longueur de corrélation T . Les valeurs de σ et T sont supposées être très grandes devant la longueur d'onde λ ($\lambda = 0,555 \mu\text{m}$) et la rugosité $r = \sigma / T$ de la surface est petite devant 1. Dans ces conditions, les caractéristiques statistiques de la surface vérifient bien le domaine de validité du modèle de Kirchhoff (§2.3.3.4). En outre, le paramètre g est lui aussi très grand devant 1 et, au sens de la réflexion de la lumière, cela implique que la surface est très rugueuse.

D'après l'équation (2-21), la composante spéculaire q_{sp} du coefficient de luminance de la surface reste toujours nulle :

$$q_{sp}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = 0$$

Comme dans la plupart des cas, la composante diffuse uniforme q_{du} est choisie proportionnelle au coefficient de luminance d'un diffuseur parfait $q = 1 / \pi$, d'où :

$$q_{du}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = \rho_{du} \cdot \frac{1}{\pi}$$

Le coefficient ρ_{du} permet de tenir compte de l'absorption du matériau de la surface. Sa valeur est inférieure ou égale à 1. Si ρ_{du} vaut 1, toute l'énergie qui a pénétré dans le matériau ressort vers l'extérieur. En revanche, si $\rho_{du} = 0$, le matériau est parfaitement absorbant.

Étant donné que la surface est supposée très rugueuse, la série de l'équation (2-23) se simplifie et est transformée en une simple exponentielle ([BEC 63], §5.3), de telle sorte que :

$$e^{-g} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m \cdot m!} e^{-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4m}} \approx \frac{1}{g} e^{-\frac{v_{xy}^2 T^2}{4g}}$$

L'intensité incohérente diffusée par unité d'angle solide est directement reliée à l'intensité incohérente donnée par l'équation (2-23). En utilisant la valeur du flux incident Φ_i reçu par la surface $\Phi_i = \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cdot A^2 \cdot S \cos(\theta_i)$, les définitions de l'éclairement (1-2), de la luminance (1-4), du coefficient de luminance (1-11), et la simplification précédente, le coefficient de luminance q_{dd} de la composante diffuse directionnelle est finalement donné par :

$$q_{dd}(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{F \cdot C(\theta_i; \theta_r, \phi_r)}{16\pi \cos(\theta_r) \cos(\theta_i)} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{1}{\cos^4(\nu)} \cdot e^{-\frac{\tan^2(\nu)}{4r^2}} \quad (2-30)$$

Dans cette équation, F est le facteur de Fresnel (équations 1-6 à 1-8), C le coefficient de «masquage / ombrage» (équations 2-24 et 2-27) et ν l'angle défini par :

$$\cos^2(\nu) = \frac{v_z^2}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} = \frac{(\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r))^2}{2(1 + \cos(\theta_i)\cos(\theta_r) + \sin(\theta_i)\sin(\theta_r)\cos(\phi_r))}$$

La composante diffuse directionnelle q_{dd} dépend donc des directions d'éclairages (θ_i, ϕ_i) et d'observations (θ_r, ϕ_r) ⁶, du paramètre de rugosité r et de l'indice de réfraction n du matériau de la surface. Si les variations de cet indice n sont faibles avec la longueur d'onde λ , alors q_{dd} devient indépendante de λ .

Pour un échantillon donné, la connaissance des valeurs des paramètres suivants est suffisante pour spécifier entièrement la réflexion de la surface :

- n , l'indice de réfraction du matériau de la surface,
- $r = \sigma / T$, le paramètre de rugosité de cette surface,
- ρ_{du} , coefficient de la composante diffuse uniforme q_{du} .

Sur la figure 2.8 sont présentés les résultats du modèle de Kirchhoff complet pour différentes rugosités r de surface et différents angles d'éclairage θ_i . Les paramètres statistiques des surfaces sont $\sigma = 1$ et $T = \{5 ; 10 ; 15 ; 20\}$ (valeurs exprimées en millimètres), ce qui donne comme rugosité $r = \{0,2 ; 0,1 ; 0,07 ; 0,05\}$. Les autres paramètres du modèle sont fixés et ont pour valeurs : $n = 1,5$ et $\rho_{du} = 1$. Les courbes donnent, en coordonnées polaires et dans le plan d'éclairage ($\phi_i = 0^\circ$ et $\phi_r = \{0^\circ ; 180^\circ\}$), la valeur du coefficient de luminance multiplié par le cosinus de l'angle d'observation θ_r . Les unités sont arbitraires mais homogènes ce qui permet une comparaison entre les différents graphiques.

Deux comportements types sont observés. Tout d'abord, pour la surface la plus rugueuse ($r = 0,2$), seule la composante diffuse uniforme q_{du} est significative. Quel que soit l'angle d'éclairage, cette surface a un comportement lambertien (une légère déformation peut cependant être observée pour $\theta_i = 80^\circ$). À l'inverse, pour la surface la plus «lisse» ($r = 0,05$), la composante diffuse directionnelle q_{dd} est visible pour un éclairage normal et devient ensuite prédominante pour les éclairages rasants et les directions d'observations proche de la direction de spécularité. Dans ces conditions d'éclairage, le pic observé est le résultat de deux effets qui s'additionnent : la rugosité apparente de la surface diminue (cela est dû à la présence du facteur $\cos(\theta_i) + \cos(\theta_r)$ dans l'expression de g) et le coefficient de Fresnel prend des valeurs plus grandes (fig. 1.3).

Pour les rugosités intermédiaires ($r = 0,1$ et $r = 0,07$), le coefficient de luminance se déforme progressivement avec pour limites les deux comportements précédents. Dans tous les cas, les résultats des observations de la vie courante sont retrouvées :

6. Pour simplifier les notations, ϕ_i est toujours égal à 0° . Dans ce cas, la direction de spécularité est définie par $\phi_r = 180^\circ$ et $\theta_i = \theta_r$.

- les surfaces très rugueuses réfléchissent la lumière de manière diffuse,
- pour les observations et les éclairages rasants la réflexion est très spéculaire.

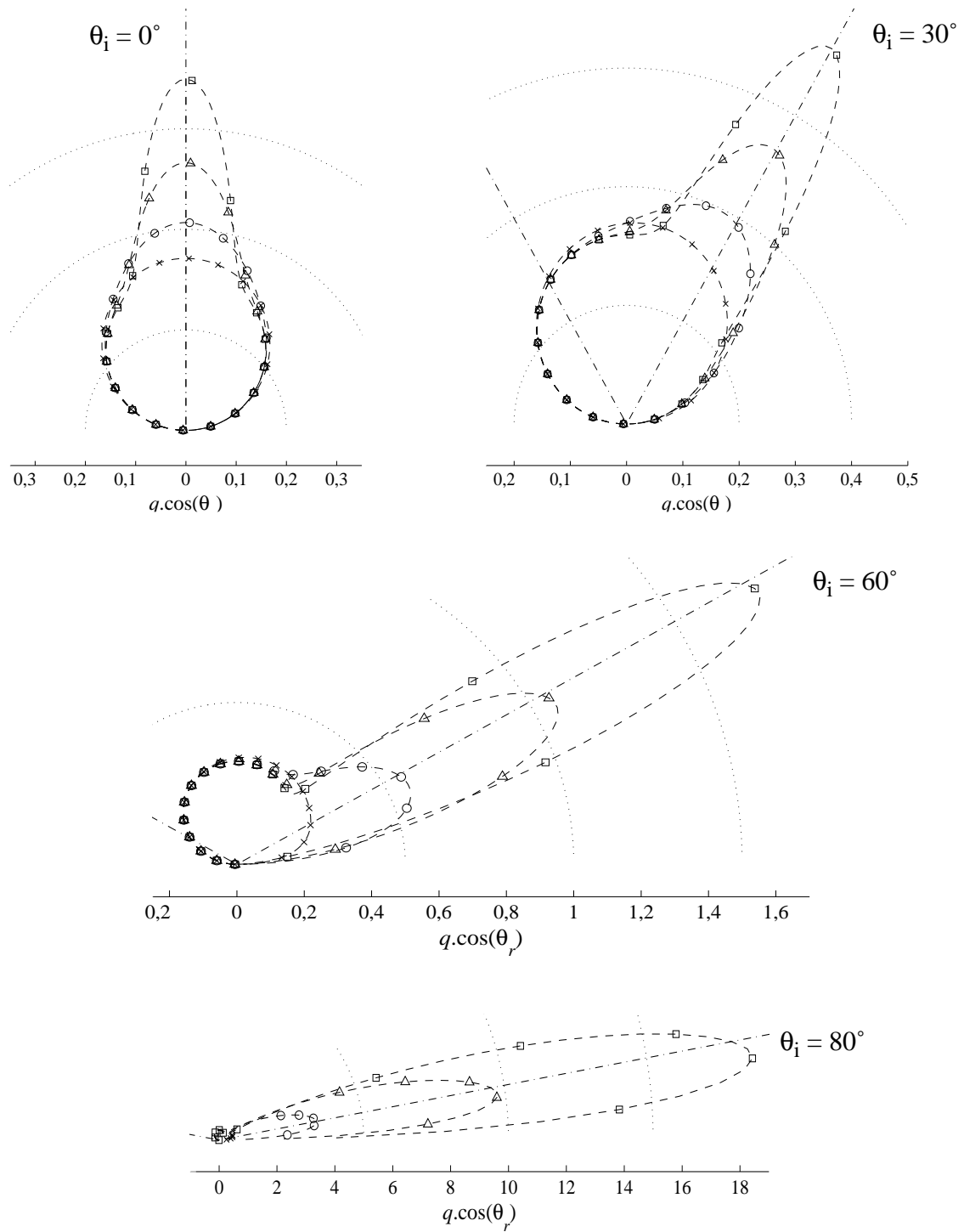


Figure 2.8 Modèle de Kirchhoff en fonction de l'angle d'éclairage θ_i et de la rugosité r de la surface : $r = 0,2$ (croix), $r = 0,1$ (cercles), $r = 0,07$ (triangles) et $r = 0,05$ (carrés).

Remarque :

Une autre méthode pour calculer la répartition spatiale de la lumière réfléchiée par une surface rugueuse a été proposée par Torrance et Sparrow [TOR 67], puis améliorée par Oren [ORE 95]. La surface est ici divisée en un grand nombre de facettes élémentaires orientées aléatoirement et au comportement purement spéculaire. À chaque combinaison d'une direction d'éclairage et d'une direction d'observation, il existe un certain nombre de facettes, dont la normale est proche de la bissectrice de ces deux directions. Ces facettes correctement orientées autorisent une réflexion spéculaire entre ces deux directions. Les normales des facettes sont supposées être distribuées autour de cette bissectrice selon une loi gaussienne.

Dans le cas où la surface est peu rugueuse, plus précisément quand $2\sigma \ll T$, Beckmann a montré que l'hypothèse d'une distribution normale des pentes est identique à celle d'une distribution normale des hauteurs de la surface associée à une fonction d'autocorrélation gaussienne (cf. appendice D de [BEC 63]). L'écart-type des pentes σ_p des facettes est alors relié à la rugosité r de la surface par la relation :

$$\sigma_p = \sqrt{2}r = \frac{\sqrt{2}\sigma}{T}$$

Ces deux représentations de la surface sont donc équivalentes et les deux modèles conduisent à des expressions similaires pour le coefficient de luminance.

2.3.6 Application du modèle de Kirchhoff aux surfaces routières

L'utilisation du modèle de Kirchhoff pour les revêtements de chaussée ne pourra se faire que si toutes les hypothèses sont respectées. La plus importante d'entre elles porte sur la rugosité de la surface. À ce stade, un premier problème se pose, car les surfaces routières sont caractérisées par au moins deux échelles de texture.

La macrotexture de ces surfaces découle de hauteurs macroscopiques comprises entre 0,1 et 10 mm [LUC 88]. Cette macrotexture, due à la présence des granulats sur la surface supérieure des revêtements, se manifeste sous la forme de trous (cas des enrobés drainants) ou de pics (enduits superficiels). À l'échelle microscopique (variations de hauteurs inférieures à 0,1 mm), l'état de surface des granulats ou du mastic devient prépondérant et une microtexture apparaît. Des mesures effectuées au LCPC-Nantes ont montré que, sur des roches, la valeur moyenne de l'écart-type des hauteurs σ est de l'ordre de 40 μm . Ces valeurs ont été obtenues en analysant des profils linéaires relevés sur différents types de roches utilisées pour la fabrication des granulats (aucune mesure sur les surfaces des mastics n'est disponible). Dans les deux cas et sous un éclairage en lumière visible ($\lambda = 0,5 \mu\text{m}$), les revêtements routiers peuvent être considérés comme des surfaces très rugueuses, car les valeurs de g restent très grandes devant 1. Cependant, la présence de ces deux échelles de texture qui se superposent n'est pas prise en compte par le modèle de Kirchhoff. Pour le faire, il est nécessaire de revoir les équations en introduisant par exemple une distribution des hauteurs composée [OGI 91]. Mais, cette méthode pose de nombreuses difficultés, en particulier pour déterminer le coefficient de «masquage / ombrage».

Un autre problème consiste à fixer les valeurs des paramètres physiques n , σ , T et du coefficient ρ_{du} . En général, les cas où tous les paramètres sont connus sont très rares. Le plus souvent, l'indice de réfraction n et l'écart-type des hauteurs σ sont mesurés et les autres paramètres sont obtenus en ajustant les résultats du modèle à des mesures expérimentales (par exemple, voir [EMB 94], [GIN 98] et [HE 93]). Le défaut de cette méthode est que les valeurs prises par certains paramètres n'ont plus de réel sens physique. La démarche suivie par la suite est au contraire d'utiliser au maximum des valeurs mesurées. Les valeurs de l'indice de réfraction n sont connues pour les matériaux simples, mais pas pour ceux composés de plusieurs éléments. Pour une roche ou pour un liant, un indice moyen doit donc être utilisé.

De plus, le paramètre de rugosité d'une surface n'est pas facile à déterminer. Par une mesure du profil de cette surface, la valeur de σ est accessible, mais la longueur de corrélation T est plus difficile à calculer, car les résultats sont difficiles à interpréter [STOUT]. Enfin, le coefficient ρ_{du} , qui correspondent à la contribution relative de la composante diffuse uniforme, ne peut pas être mesuré expérimentalement.

D'autres difficultés s'ajoutent aux précédentes. Premièrement, le modèle de Kirchhoff considère que la surface est composée d'un matériau unique purement spéculaire. Dans de récentes publications, Oren [ORE 95] et van Ginneken [GIN 98] ont développé des modèles donnant le coefficient de luminance d'une surface décomposée en facettes parfaitement diffusantes. Mais, les chaussées font apparaître à leur surface deux constituants : le mastic et les granulats. Ces deux matériaux n'ont pas, *a priori*, la même réponse photométrique et ne sont ni purement spéculaires, ni parfaitement diffusants.

CHAPITRE 3

Vers un autre modèle numérique

Dans le chapitre 2, une approche théorique de la réflexion de la lumière par une surface rugueuse a été abordée. En particulier, le modèle de l'approximation de Kirchhoff a été largement développé. Cependant, ce modèle, qui a fait ses preuves dans de nombreux domaines, n'est pas adapté aux revêtements de chaussées. Aussi, une autre méthode est proposée pour évaluer le coefficient de luminance des surfaces routières.

Le but n'est pas de donner une autre formulation analytique pour le coefficient de luminance d'une surface, mais de calculer celui-ci numériquement. Le principe de la simulation numérique est identique au mode de fonctionnement du goniophotomètre du LCPC. Dans un premier paragraphe (§ 3.1), cet appareil est donc présenté en détails. Les caractéristiques optiques de ce goniophotomètre sont simulées en utilisant la technique dite du «tracé de rayons» (§ 3.2.1). Un des avantages de la simulation réside dans le fait que les réflexions multiples et les effets de «masquage / ombrage» sont automatiquement pris en compte. Comme pour tout modèle, diverses hypothèses sont nécessaires pour la représentation géométrique de la surface étudiée (§ 3.2.4.1) et la définition des modes de réflexion de la lumière (§ 3.2.4.2).

Après la présentation de ce nouvel outil de calcul, appelé par la suite «le goniophotomètre virtuel», sa validation est développée dans le paragraphe 3.3. Dans un premier temps, cette validation permet de fixer les valeurs de certains paramètres du calcul comme le nombre de rayons lancés (§ 3.3.1). Puis, les résultats obtenus avec le goniophotomètre virtuel sont comparés aux prévisions du modèle théorique de Kirchhoff (§ 3.3.2).

3.1 Le goniophotomètre du laboratoire

Le goniophotomètre du LCPC a été spécialement conçu pour mesurer les propriétés de réflexion des surfaces routières. Il suit précisément les différentes recommandations de la CIE définies pour ce type de mesures [CIE 95]. Le principe de fonctionnement de ce goniophotomètre, ainsi que ses caractéristiques photométriques, sont données dans [COU 96]. Il est schématiquement représenté sur la figure 3.1 et il peut être décomposé en deux parties : la source de lumière et le capteur photosensible.

La source lumineuse est une lampe halogène de 250 W se trouvant dans une boîte hermétique fixe. Un système optique en sortie de la source permet d'obtenir un faisceau de rayons parallèles. Ce faisceau est dirigé vers l'échantillon étudié à l'aide d'un jeu de trois miroirs (notés $M1$, $M2$ et $M3$). Ces miroirs sont solidaires au *bras d'éclairage* qui peut tourner autour de l'axe de la source par l'intermédiaire du moteur pas-à-pas MT γ . Ainsi, l'angle d'éclairage γ^1 varie entre 0° (éclairage normal) et 85° (éclairage rasant), avec un pas minimum de $0,1^\circ$. En sortie de la source et avant le premier miroir $M1$, se trouve un diaphragme de forme carrée. La taille de ce diaphragme fixe la dimension de la surface éclairée sur l'échantillon ; cette surface est un carré de 100 mm de côté.

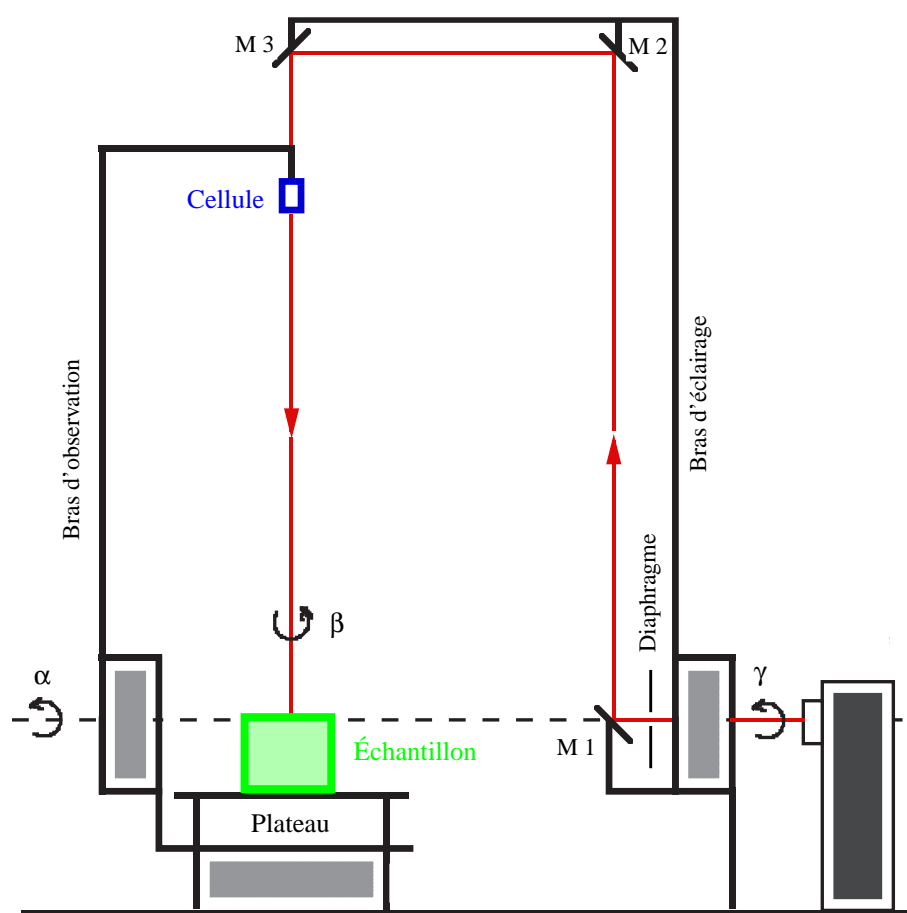
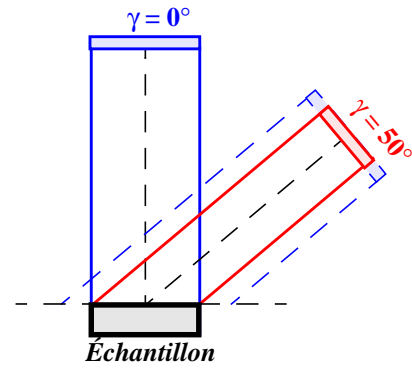


Figure 3.1 Schéma de fonctionnement du goniophotomètre du LCPC.

1. Les angles utilisés sont ici ceux définis par la CIE (§ 1.3.1).

Un principe important de la mesure est de maintenir constante l'aire de la surface éclairée. Or, le fait de modifier l'angle d'éclairage γ fait augmenter la taille de la tache de lumière projetée sur l'échantillon. En effet, l'image du diaphragme (un carré) projetée sous l'angle γ sur un plan horizontal est un rectangle de taille plus grande.



Pour remédier à ce problème, la forme du diaphragme doit être modifiée en fonction de l'angle γ . Le carré initial est alors transformé en un rectangle par un système de deux volets pilotés par deux moteurs pas-à-pas indépendants. Théoriquement, la position des volets est déterminée par une loi en $\cos(\gamma)$. Cependant pour des raisons de précision, la position de ces volets est mesurée expérimentalement pour certaines valeurs de γ . Puis, une interpolation linéaire est effectuée entre ces points pour obtenir la position des volets pour l'ensemble des valeurs prises par l'angle γ .

La seconde partie du goniophotomètre est constituée du capteur qui permet de mesurer le coefficient de luminance q . Cette mesure est effectuée à l'aide d'une cellule photoélectrique équipée d'un filtre $V(\lambda)$ et montée sur le *bras d'observation*. Ce bras possède deux degrés de liberté qui sont les deux angles α et β^2 . Deux moteurs pas-à-pas $MT \alpha$ et $MT \beta$ sont utilisés pour déplacer l'observateur et balayer un demi-hémisphère au dessus de l'échantillon. L'échantillon est placé sur un plateau solidaire du moteur $MT \beta$. Ainsi, si l'angle δ est égal à 0° , l'observation de l'échantillon se fait dans l'axe de la chaussée. La figure 3.2 montre que la surface éclairée (carré plein) est modifiée avec l'angle β , car sa position change par rapport à l'axe de l'échantillon (flèche). En revanche, la surface vue depuis la cellule est toujours la même, car elle est plus grande que la surface éclairée (c'est pour cette raison que la mesure du coefficient de luminance se fait dans le noir complet).

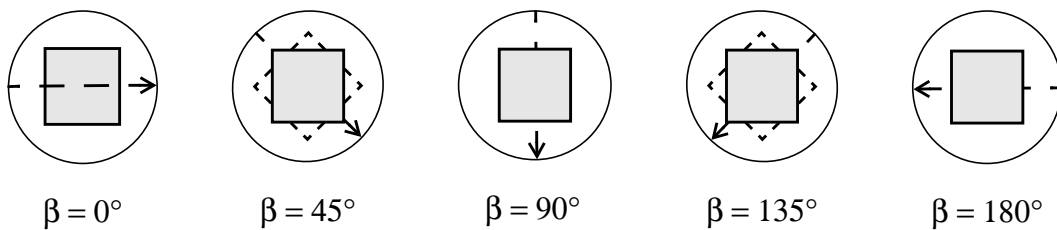


Figure 3.2 Différence entre la surface éclairée et la surface vue en fonction de l'angle d'observation β .

Les variations des angles α et β sont alors respectivement de 0° à 90° et de 0° à 180° , avec un pas minimum de $0,1^\circ$. Pour diminuer le temps d'une mesure complète, lié en grande partie aux rotations des moteurs pas-à-pas, le nombre total de points de mesure est limité. Les valeurs des trois angles α , β et γ sont fixées à :

2. Les relations entre les angles α , β , γ et δ et les angles θ_i , ϕ_i , θ_r et ϕ_r des coordonnées sphériques sont : $\alpha = 90^\circ - \theta_r$, $\beta = 180^\circ - (\phi_r + \phi_i)$, $\gamma = \theta_i$ et $\delta = \phi_r$.

- $\alpha \in \{1,3; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90\}$,
- $\beta \in \{0; 5; 10; 20; 30; 50; 70; 90; 110; 130; 150; 170; 175; 180\}$,
- $\gamma \in \{0; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 85\}$.

Malgré des déplacements optimisés, une mesure complète d'un échantillon (contenant 2700 points de mesure) prend environ 3h 30mn. Il faut remarquer que, pour $\beta = 180^\circ$ et pour certaines combinaisons des angles α et γ , le capteur se trouve devant la source. Pour y remédier, l'angle d'éclairage γ est conservé et le capteur est décalé de -2° et $+2^\circ$ autour de la valeur initiale de l'angle α .

La valeur du coefficient de luminance q (§ 1.2.2.3) s'obtient indirectement par la mesure des deux éclairagements E_0 et E_r . Il s'agit d'une part, de l'éclairagement E_0 mesuré dans le plan perpendiculaire à la direction incidente de la lumière et d'autre part, de l'éclairagement E_r reçu par la cellule photoélectrique. En effet, l'éclairagement E reçu par la surface éclairée de l'échantillon est relié à l'éclairagement E_0 : $E = E_0 \cos(\gamma)$. La luminance L de la surface, dans la direction définie par les angles α et β , est quant à elle déterminée en mesurant l'intensité lumineuse I réfléchie par la surface. D'après la relation (1-4), la luminance L est reliée à l'intensité I par la relation $L = I/(S \sin(\alpha))$, S étant l'aire de la surface éclairée. La valeur de l'intensité I peut être obtenue en mesurant l'éclairagement E_r reçu par la cellule photoélectrique. D'après la loi de Bouguer, I et E_r sont proportionnels et $I = E_r d^2$, où d est la distance entre la cellule et la surface de l'échantillon.

Finalement, en utilisant toutes ces relations, le coefficient de luminance q est le résultat de l'équation suivante :

$$q = \frac{E_r d^2}{S E_0 \cos(\gamma) \sin(\alpha)}$$

Les caractéristiques du goniophotomètre sont telles que la distance d est de 1,5 m et la surface S de $100 \times 100 \text{ mm}^2$. L'éclairagement est de l'ordre de 2000 lx.

3.2 Le «goniophotomètre virtuel»

3.2.1 Principe général

Pour faciliter la comparaison de données expérimentales avec les résultats des simulations numériques, le goniophotomètre virtuel reprend les caractéristiques du goniophotomètre du LCPC. Le goniophotomètre virtuel, représenté schématiquement sur la figure 3.3, se compose de trois parties : une source de lumière, un échantillon et un récepteur. Comme pour la mesure en laboratoire, le principe de la simulation consiste à éclairer l'échantillon étudié et à

analyser la répartition de la lumière réfléchie par la surface de cet échantillon en fonction de la direction d'observation.

Pour recréer les conditions expérimentales du goniophotomètre du laboratoire, la technique utilisée est celle du «tracé de rayons». Cette technique, développée à l'origine dans le domaine de la synthèse d'image [PER 98], permet de calculer l'image d'une scène vue par un observateur. Généralement, la scène est constituée d'objets opaques ou transparents et d'une ou plusieurs sources lumineuses. L'observateur regarde cette scène à travers l'écran d'un ordinateur et pour chacun des pixels de l'écran, l'objectif est de déterminer quel objet est vu, sous quelle incidence et dans quelles conditions cet objet est éclairé par la ou les sources lumineuses.

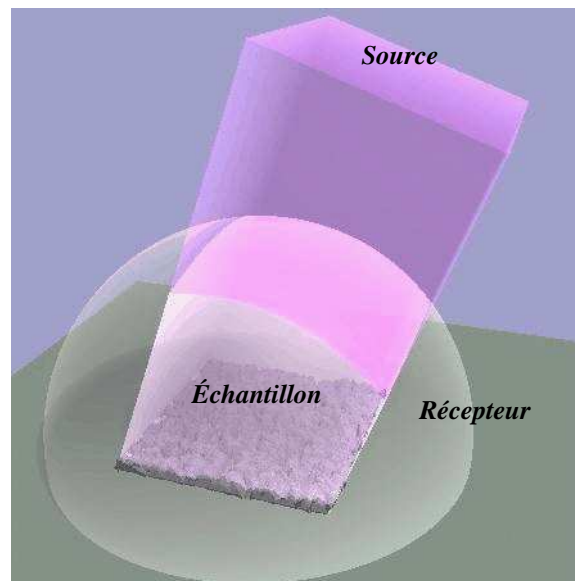


Figure 3.3 Représentation schématique du goniophotomètre virtuel.

Cette technique a été légèrement modifiée pour calculer le coefficient de luminance d'une surface. Dans le cas du goniophotomètre virtuel, la scène contient uniquement deux objets : l'échantillon et la source. Le récepteur devient l'équivalent de l'œil de l'observateur. L'énergie lumineuse émise par la source est décomposée en paquets de photons matérialisés par des rayons lumineux. L'objectif est de suivre le parcours de ces rayons, qui partent de la source, se réfléchissent une ou plusieurs fois sur la surface et arrivent jusqu'au récepteur. C'est ce dernier qui permet d'enregistrer le coefficient de luminance q de la surface.

Remarque :

Le goniophotomètre virtuel a été réalisé en partant du logiciel Yart. Ce logiciel, développé par le Laboratoire d'Images de Synthèses de l'École des Mines de Saint-Étienne (LISSE), dirigé par B. Péroche, contient un grand nombre de fonctionnalités utilisées pour le calcul d'images par la technique du tracé de rayons. Seuls les modules nécessaires au calcul du coefficient de luminance d'une surface ont été conservés. Ils ont été complétés par d'autres modules permettant de décrire le récepteur et la surface.

3.2.2 Fonctionnement du «goniophotomètre virtuel»

3.2.2.1 Le tracé de rayons

Du point de vue informatique, un rayon est caractérisé par trois variables : un point d'origine O , un vecteur directeur \mathbf{u} et un flux énergétique transporté ε . Tout point P sur ce rayon est défini sans ambiguïté par son abscisse λ sur ce rayon : $P = O + \lambda \mathbf{u}$. Le point d'intersection P d'un rayon avec un objet est donc déterminé par la valeur de l'abscisse λ . Le principe de l'algorithme est de chercher, pour un rayon déterminé, quel est le premier objet intercepté par ce rayon, c'est-à-dire celui pour lequel la valeur de λ est la plus petite.

Quand un **rayon primaire** (rayon issu de la source) tombe sur la surface de l'échantillon, le point d'intersection P entre ce rayon et la surface est calculé. Le point P devient alors le point d'origine d'un **rayon secondaire**, qui est le rayon réfléchi par la surface. La nouvelle direction \mathbf{u} et le flux ε du rayon secondaire sont déterminés. Le calcul de ces deux quantités dépend du modèle physique qui caractérise la réflexion de la lumière par le matériau de la surface (§3.2.4.2).

Si après cette première réflexion le rayon secondaire n'intercepte plus la surface et se dirige vers le récepteur, la réflexion est unique sur la surface : il s'agit d'une **réflexion simple** (fig. 3.4). Au contraire, si le rayon secondaire rencontre à nouveau la surface, le rayon effectue plusieurs réflexions et la réflexion est dite **réflexion multiple**. Ce rayon secondaire, qui se réfléchit plusieurs fois, est suivi jusqu'à ce qu'il rencontre le récepteur. Après chaque réflexion, le flux ε transporté par un rayon diminue et sa contribution au coefficient de luminance devient plus faible. Un test est donc mis en place pour stopper le suivi d'un rayon qui s'est réfléchi plusieurs fois et dont l'énergie est inférieure à un certain seuil.

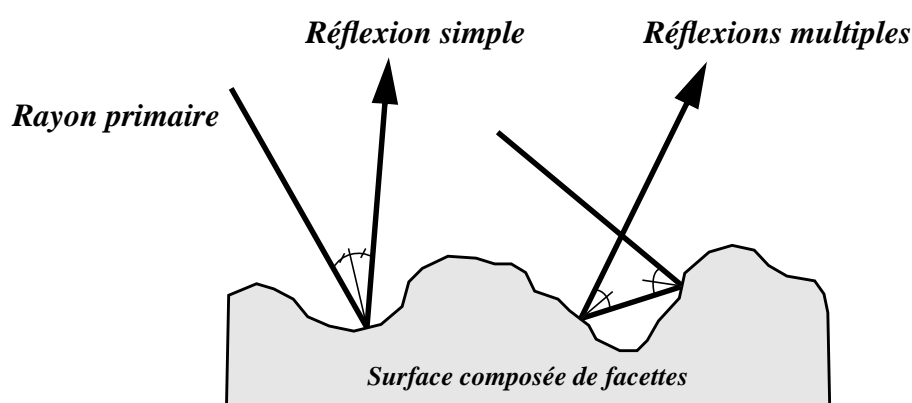


Figure 3.4 Comportements d'un rayon primaire : le rayon secondaire généré après la réflexion ne rencontre plus la surface (cas de la réflexion simple), ou heurte plusieurs fois la surface (cas des réflexions multiples).

Une fois que le rayon secondaire rencontre le récepteur, sa direction \mathbf{u} et son flux ε sont enregistrés. Dès que le suivi d'un rayon est stoppé (par l'arrivée du rayon sur le récepteur ou par le seuil en énergie), un nouveau rayon primaire est lancé et le processus de suivi recom-

mence. En lançant un nombre N de rayons, les conditions d'un véritable éclairage sont recréées. Les données stockées pour chaque rayon sont ensuite utilisées pour le calcul du coefficient de luminance q de la surface.

L'algorithme utilisé s'écrit symboliquement sous la forme suivante :

```
Charger le profil de la surface

Initialiser  $N$ 

Pour  $i$  de 1 à  $N$  faire

    générer le rayon  $i$ 
        calculer son origine
        calculer sa direction
        flux initialisé à 1

    tester l'intersection du rayon avec la surface

    tant que (le flux du rayon est supérieur à un minimum)
        et (le rayon intercepte la surface)

        déterminer le rayon réfléchi
            calculer son origine (identique au point d'intersection)
            calculer sa direction
            calculer le flux transporté

        tester l'intersection du rayon réfléchi avec la surface

    fin tant que

    si (le flux du rayon est supérieur au minimum)
        stocker le flux transporté par le rayon au niveau du récepteur

fin de la boucle pour

Enregistrer le coefficient de luminance de la surface dans un fichier
```

La technique du tracé de rayons présente deux avantages importants par rapport aux différents modèles théoriques. D'une part, les *réflexions multiples* que peut subir un rayon lumineux sont prises en compte. Cet algorithme permet d'avoir facilement accès aux proportions relatives de rayons ayant interagi une, deux, trois fois ou plus avec la surface. D'autre part, les effets de «masquage / ombrage» sont directement intégrés aux calculs et aucune correction n'est nécessaire sur les résultats.

3.2.2.2 L'algorithme du suivi des rayons

Contrairement aux modèles théoriques (§2.3), le goniophotomètre virtuel ne nécessite aucune hypothèse sur la distribution des hauteurs de la surface étudiée. Cette surface est représentée par une matrice bi-dimensionnelle donnant les altitudes $z(i, j)$ de la surface pour un maillage régulier, de pas Δx et Δy , suivant les deux directions Ox et Oy . En considérant quatre points voisins du profil, points repérés par les coordonnées (i, j) , $(i+1, j)$, $(i+1, j+1)$ et $(i, j+1)$, une facette peut être définie.

L'objectif du suivi de rayon est de vérifier que la surface est touchée par le rayon primaire, et de déterminer le plus rapidement possible quelle est exactement la facette sur laquelle a lieu la réflexion. Pour réaliser ce suivi, un algorithme du type incrémental est utilisé [COQ 84]. Après le chargement du champ d'altitudes, la boîte englobante de la surface est calculée. Cette boîte abstraite est le plus petit parallélépipède qui contient toute la surface³ (fig. 3.5). Deux côtés opposés du parallélépipède définissent une tranche d'espace (en anglais «slab»), qui représente l'espace compris entre les deux plans parallèles tels que $p_{min} < ax + by + cz < p_{max}$. L'intersection d'un rayon avec une tranche d'espace donne deux abscisses λ_0 et λ_1 le long de ce rayon.

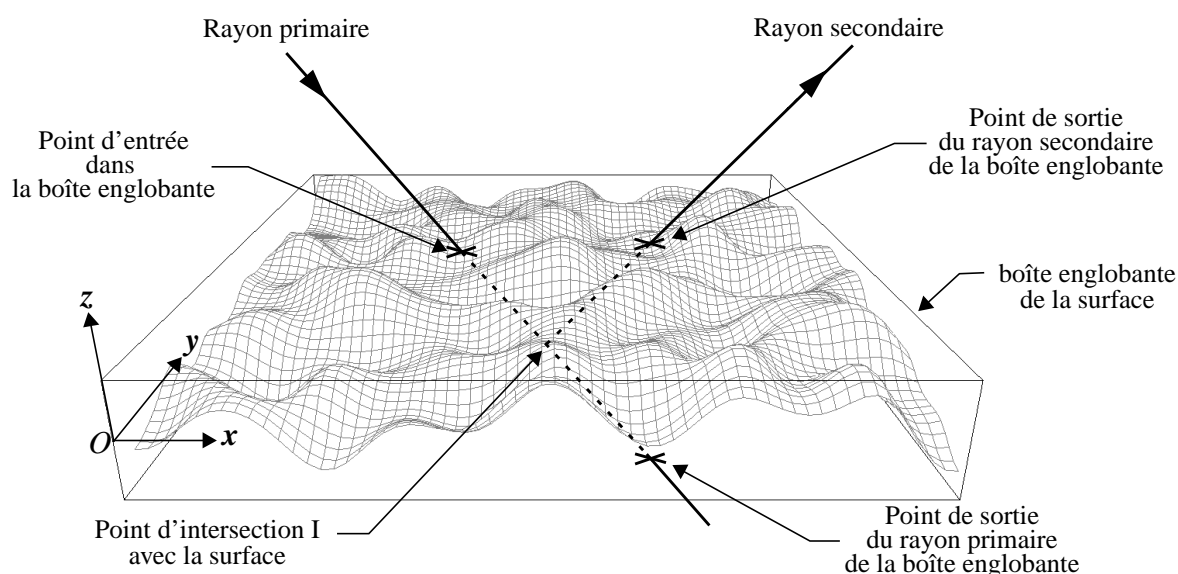


Figure 3.5 Définition de la boîte englobante de la surface et des points d'entrée et de sortie des rayons primaires et secondaires.

Si un rayon primaire intercepte la boîte englobante, un point d'entrée et un point de sortie de cette boîte sont définis, ainsi que les abscisses λ_{min} et λ_{max} correspondantes. Le suivi du rayon se fait alors uniquement le long du segment de ce rayon compris entre ces deux abscisses.

Pour simplifier le problème, le suivi des rayons n'est pas réalisé dans l'espace à 3 dimensions de la surface, mais dans un espace 2D constitué par une grille régulière obtenue par la projection des points de la surface sur le plan $z = 0$. Les points de la grille sont repérés par leurs indices (i, j) et l'élément (i, j) de la grille est délimité par les points (i, j) , $(i+1, j)$, $(i+1, j+1)$ et $(i, j+1)$. Le rayon suivi, qui est également projeté sur le plan, est caractérisé par son point d'entrée et son point de sortie de la grille (fig. 3.6).

3. Quelle que soit la taille réelle de l'échantillon, la base de la boîte englobante est ramenée, par une homothétie, à un carré unitaire. Ceci est fait d'une part, pour diminuer les temps de calcul dans le programme de suivi des rayons et d'autre part, pour faciliter l'ajout de nouvelles fonctionnalités. Cette homothétie n'a aucune influence sur la précision des résultats.

À partir du point d'entrée, l'intersection du rayon avec l'élément courant (i, j) est testée. Si ce test est négatif, c'est-à-dire que le rayon passe au dessus de la surface de la facette correspondant à l'élément courant, alors l'élément suivant de la grille traversé par le rayon est cherché. Pour cela, les points d'intersection P_i et P_{i+1} du rayon avec la tranche d'espace $i\Delta x < x < (i+1)\Delta x$ de l'élément courant sont calculés, ainsi que les points Q_i et Q_{i+1} associés à la tranche d'espace $j\Delta y < y < (j+1)\Delta y$. À chaque point correspond une abscisse le long du rayon et pour chaque tranche d'espace, seule est conservée la plus grande des abscisses, notée respectivement λ_P et λ_Q .

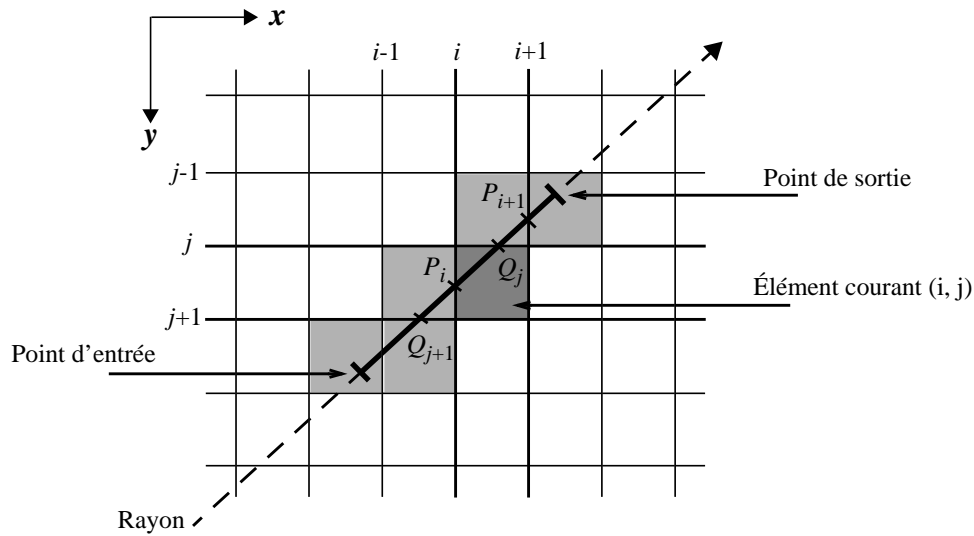


Figure 3.6 Suivi du rayon projeté sur la grille régulière.

En comparant les deux valeurs λ_P et λ_Q et en tenant compte du sens d'entrée du rayon dans la tranche d'espace donnant la plus petite valeur de l'abscisse (cas 1 : le rayon entre par la borne inférieure, cas 2 : le rayon entre par la borne supérieure), le nouvel élément de la grille est déterminé de la manière suivante :

```

si (  $\lambda_P < \lambda_Q$  )
    si ( cas 1 )
        incrémenter i
    sinon
        décrémenter i

sinon si (  $\lambda_P > \lambda_Q$  )
    si ( cas 1 )
        incrémenter j
    sinon
        décrémenter j

sinon
    si ( cas 1 )
        incrémenter i
        incrémenter j
    sinon
        décrémenter i
        décrémenter j

```

Dans le cas présenté sur la figure 3.6, l'élément courant est caractérisé par les indices (i, j) . L'abscisse λ_P correspondant au point P_{i+1} est plus grande que l'abscisse λ_Q correspondant au point Q_j . De plus, pour la tranche d'espace définie par $j\Delta y < y < (j+1)\Delta y$, l'entrée du rayon se fait par la borne supérieure $(j+1)\Delta y$, ce qui conduit au cas 2. D'après l'algorithme précédent, l'élément suivant traversé par le rayon est donc l'élément $(i, j-1)$.

Si dans l'élément courant le test d'intersection est positif, un rayon secondaire est créé. Pour déterminer le point d'intersection I du rayon avec l'élément et la nouvelle direction prise par le rayon réfléchi, il est nécessaire de connaître l'équation mathématique définissant la surface de l'élément (§ 3.2.4.1). Une fois que le point d'intersection I et la direction sont obtenus, les points de sortie du rayon secondaire de la boîte englobante et de la grille sont recherchés. Le point d'entrée du rayon secondaire dans la grille est quant à lui, le point d'intersection I . Avec ces nouvelles données, le suivi du rayon réfléchi se poursuit jusqu'à sa sortie définitive de la boîte englobante de la surface (fig. 3.5).

3.2.3 La source de lumière

La source de lumière est le point d'origine des rayons (primaires) lancés vers l'échantillon. Cette source a les mêmes caractéristiques que la source utilisée sur le goniophotomètre du LCPC :

- la lumière est blanche,
- les rayons forment un faisceau parallèle,
- l'éclairement produit sur la surface de l'échantillon est uniforme.

Ces propriétés entraînent des contraintes sur le choix de l'origine, de la direction et de l'énergie initiale des rayons quittant la source.

Tout d'abord, utiliser une lumière blanche signifie que l'aspect spectral de la lumière n'intervient pas. Le flux ϵ transporté par les rayons est donc indépendant de la longueur d'onde et au départ de la source, ce flux ϵ est fixé à 1.

Pour générer un faisceau de rayons parallèles, la direction de tous les rayons doit être identique. Ceci implique que le vecteur directeur \mathbf{u} est le même pour tous ces rayons. Les coordonnées de ces vecteurs dépendent uniquement de l'angle d'éclairage θ_i utilisé dans la simulation. Comme le montre la figure 3.7, si un point de la source est située dans le plan Oxz avec $\phi_i = 0^\circ$, alors sa direction \mathbf{u} est de la forme :

$$\mathbf{u} = \begin{cases} \cos(\theta_i) \\ 0 \\ -\sin(\theta_i) \end{cases}$$

En revanche, les points d'origine des rayons sur la source sont différents et leur répartition fixe l'étendue géométrique et les propriétés d'uniformité du faisceau.

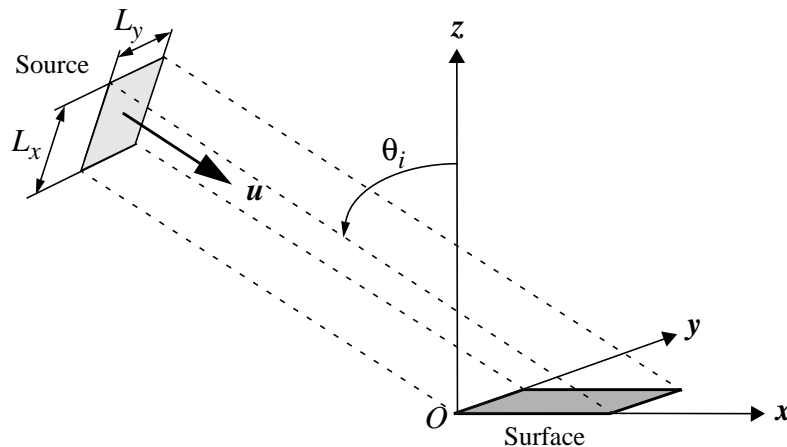


Figure 3.7 Éclairage de la surface sous un angle d'incidence θ_i .

Le point le plus difficile à réaliser est l'éclairage uniforme de la surface. En effet, il faut que la distribution spatiale des coordonnées (x_i, y_i) des origines des rayons soit uniforme sur la surface de la source. Pour obtenir une telle distribution, de nombreuses méthodes d'échantillonnage ont été développées pour la synthèse d'image (voir [COO 84] et [DIP 85]). Pour le goniophotomètre virtuel, trois méthodes ont été envisagées :

- un échantillonnage régulier, les coordonnées (x_i, y_i) sont réparties régulièrement suivant les deux dimensions L_x et L_y de la source ;
- un échantillonnage aléatoire, les coordonnées (x_i, y_i) sont deux variables aléatoires indépendantes qui suivent une loi de distribution uniforme respectivement sur $[0, L_x]$ et $[0, L_y]$;
- un «jittering», la grille d'échantillonnage régulier est perturbée par l'ajout d'un bruit uniforme.

La méthode la plus simple à mettre en oeuvre est l'échantillonnage régulier qui dépend de la taille de la source et du nombre total de rayons lancés pour la simulation. Cependant, cette méthode peut entraîner des erreurs systématiques appelées aliassage [PER 98]. Pour éviter cet aliassage, les méthodes stochastiques sont plus intéressantes, mais en contrepartie, elles peuvent générer du bruit. Dans la plupart des cas, ce bruit reste tout de même moins gênant qu'une erreur systématique.

De nombreuses études ont été faites pour déterminer les avantages et les défauts des méthodes d'échantillonnage stochastique. La méthode du «jittering» est la plus utilisée, car elle est peu coûteuse en temps de calcul. De plus, contrairement à un échantillonnage purement aléatoire, elle évite le groupement des points, car chaque point est cantonné dans un carré centré sur un point de la grille régulière (fig. 3.8). À l'aide du paramètre de dispersion ρ , l'écart maximum entre le point calculé et le centre du carré peut être contrôlé. Par exemple, pour $\rho = 0,5$, le point calculé se trouve dans un carré de côté deux fois plus petit alors que pour $\rho = 1$, il se trouve réparti uniformément dans le carré.

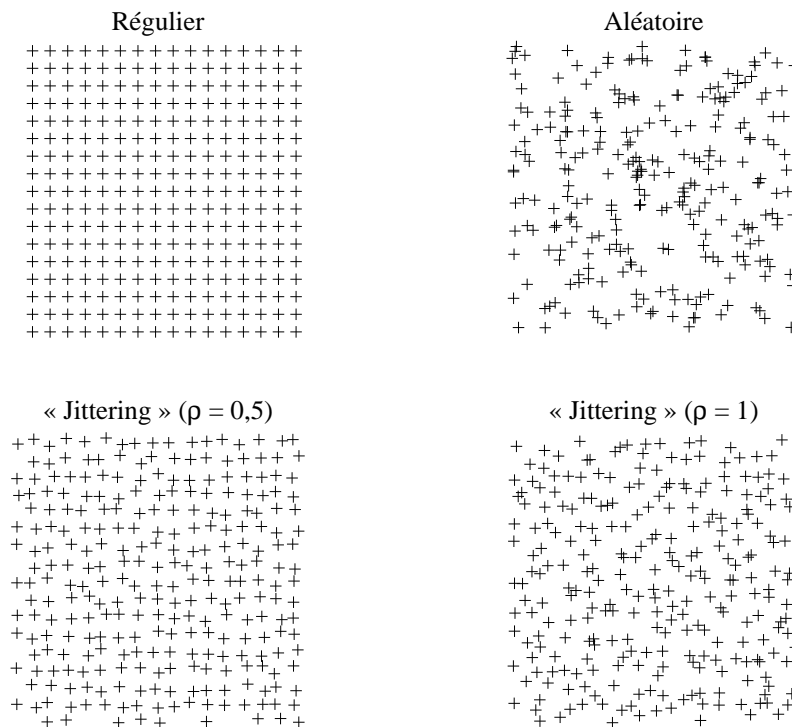


Figure 3.8 Différents échantillonnages de la source (échantillonnage d'un carré par 16 x 16 rayons).

Sur la figure 3.8, les différences observées entre les types de tirage sont importantes car le nombre de rayons est petit. Dans le cas du goniophotomètre virtuel, le nombre de rayons lancés est de l'ordre de quelques millions (§ 3.3.1). Dans ces conditions, les différents tirages donnent des répartitions des rayons pratiquement identiques. Expérimentalement, il a été vérifié que les résultats des simulations étaient indépendants du type de tirage. Pour éviter d'éventuels problèmes d'aliassage, la méthode utilisée par la suite est celle du « jittering » avec un coefficient de dispersion ρ fixé à 0,5.

Quel que soit l'angle d'éclairage, la surface éclairée de l'échantillon doit rester constante. Dans le cas d'un éclairage normal ($\theta_i = 0^\circ$), la taille de la source est donc identique à celle de la surface : c'est un carré de côté égal à 1. Comme pour le goniophotomètre du laboratoire, quand l'angle d'éclairage grandit, la taille de la source doit être modifiée pour que la source éclaire uniquement l'échantillon (§ 3.1). Le carré original est donc transformé en un rectangle qui a alors pour longueur 1 et pour largeur $\cos(\theta_i)$.

Lors d'une simulation, les rayons primaires qui arrivent au bord de la surface peuvent avoir des comportements erronés. En effet, comme la dimension de la surface est limitée, l'hypothèse que ce rayon ait déjà été intercepté par la surface ne peut pas être rejetée. Par ailleurs, un rayon primaire qui entre dans la boîte englobante de la surface peut également passer sous cette surface. Pour éviter ces « effets de bords », la surface éclairée est donc légèrement plus petite que la surface totale de l'échantillon. La largeur de la bande de la surface qui n'est pas éclairée est proportionnelle à la largeur de l'échantillon. Pour un échantillon dont la taille réelle est de 100 mm de côté, une bande de 7,5 mm est retirée ; l'aire de la surface éclairée à l'origine de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ est maintenant de $85 \times 85 \text{ mm}^2$.

3.2.4 La surface étudiée

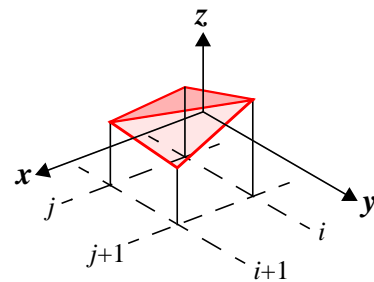
3.2.4.1 Représentation géométrique de la surface

Lors du calcul de l'intersection d'un rayon lumineux avec la surface, la connaissance, en tout point, de l'équation mathématique de cette surface est nécessaire. En considérant quatre points voisins du profil de la surface, points repérés par les coordonnées (i, j) , $(i+1, j)$, $(i+1, j+1)$ et $(i, j+1)$, une facette peut être définie. Cependant, aucune information sur la forme de la facette n'est disponible. Dans «Numerical Recipes» [PRE 92], plusieurs outils mathématiques, permettant de construire une surface entre ces quatre points, sont proposés. Deux solutions ont été retenues : l'utilisation de triangles ou de quadriques.

La représentation de la surface par une matrice limite quelque peu les profils utilisables. En effet, à chaque point d'échantillonnage correspond une seule altitude. Les facettes parfaitement verticales ou les cavités ne peuvent donc pas être modélisées. Cependant, pour une surface rugueuse quelconque, ces cas sont peu courants.

a. Utilisation de triangles

Cette méthode consiste simplement à regrouper les quatre points d'une facette en deux ensembles de trois points. De cette manière, deux nouvelles facettes sont créées. Comme ces deux facettes sont des triangles, deux plans sont ainsi définis. Les équations de ces deux plans sont de la forme $z(x, y) = ax + by + c$, où a , b et c dépendent alors des altitudes $z(i, j)$ des trois points qui les définissent.

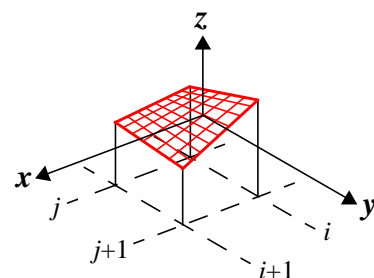


Le choix de ces deux triangles est arbitraire, car il existe à chaque fois deux possibilités pour regrouper les points en deux ensembles. Pour éviter un biais éventuel, un tirage aléatoire détermine, pour chaque facette, le choix des deux triangles.

b. Utilisation de quadriques

Pour déterminer la surface de la facette, une interpolation bi-linéaire entre les quatre points est calculée. L'équation de cette surface gauche (ou quadrique) est alors de la forme $z(x, y) = ax + by + cxy + d$. Là encore, les coefficients a , b , c et d dépendent du champ d'altitude de la surface.

Dans le cas particulier d'un échantillonnage régulier de la surface, les expressions de ces coefficients se simplifient. Elles dépendent d'une part du nombre de facettes n_x et n_y suivant les directions Ox et Oy , et d'autre part des altitudes $z(i, j)$ des quatre points définissant la facette :



$$\begin{aligned}
a &= n_x \{z(i, j) + j\Delta - z(i + 1, j)\} \\
b &= n_y \{z(i, j) + i\Delta - z(i, j + 1)\} \\
c &= -n_x n_y \Delta \\
d &= i \{z(i + 1, j) - z(i, j)\} + j \{z(i, j + 1) - z(i, j)\} - z(i, j) - ij\Delta
\end{aligned}$$

avec $\Delta = z(i + 1, j) - z(i, j + 1) - z(i, j + 1) + z(i, j)$.

Les nombres de facettes n_x et n_y sont reliés aux tailles L_x et L_y de la surface et aux pas d'échantillonnage p_x et p_y utilisés suivant les directions Ox et Oy : $n_x = L_x/p_x$ et $n_y = L_y/p_y$.

c. Remarque sur la continuité de la surface

En utilisant une représentation par des triangles ou des quadriques, la surface d'une facette a une continuité C^1 . La surface totale de l'échantillon est seulement de continuité C^0 , car la dérivée de la surface présente des discontinuités lors du passage d'une facette à sa voisine. Ceci signifie que la normale à la surface n'est pas continue et cela se traduit par la présence d'arêtes vives entre chaque facette. Cette discontinuité, intrinsèque aux deux modèles mathématiques, est due au fait que pour le calcul des différents coefficients a , b , c et d , les facettes voisines ne sont pas prises en compte. Dans ces conditions, l'utilisation des quadriques semble plus avantageuse que celle des triangles. En effet, le découpage d'une facette en deux triangles ajoute une arête supplémentaire, donc une nouvelle discontinuité pour les normales.

Il existe d'autres familles de courbes permettant d'avoir une continuité des normales sur l'ensemble de la surface : ce sont les surfaces bi-cubiques paramétrées [PRE 92]. Cependant, la définition de ces surfaces demande de connaître les valeurs prises par des «points de contrôle» (en général, les valeurs des dérivées aux points définissant la facette). De plus, ces modèles mathématiques sont très coûteux en temps de calcul pour déterminer d'une part, le point d'intersection P entre un rayon et la surface et d'autre part, la valeur de la normale au point P . C'est pour ces différentes raisons que les quadriques ont été préférées.

d. Calcul du point d'intersection d'un rayon avec une quadrique

Le test de l'intersection du rayon avec un élément étant calculé de nombreuses fois, il est intéressant du point de vue temps de calcul d'utiliser une méthode optimisée. Dans le cas où la surface de l'élément est représentée par une quadrique, le test se déroule de la manière suivante.

D'après la figure 3.9, I_E et I_S sont respectivement les points d'entrée et de sortie du rayon projeté P_R dans l'élément courant de la grille (§3.2.2.2). R_E et R_S sont les points du rayon P_R dont les projetés sur la grille sont I_E et I_S . De même, F_E et F_S sont les points du terrain dont les projetés sur la grille sont I_E et I_S . F_E (respectivement F_S) est donc le point d'intersection du segment AB (CD) avec le segment $R_E I_E$ ($R_S I_S$). Le point d'intersection I entre le rayon et le terrain est alors le point d'intersection entre les deux segments $R_S R_E$ et $F_S F_E$.

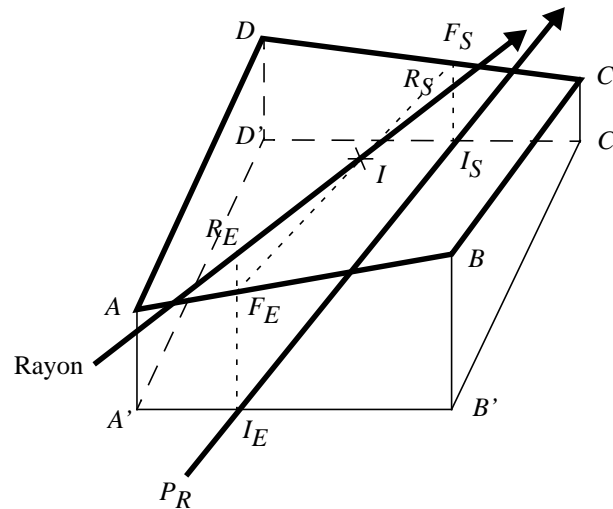


Figure 3.9 Intersection entre un rayon et un élément de surface (ici une quadrique).

L'avantage de cette méthode, lié à la représentation choisie, est de demander uniquement le calcul de l'intersection entre deux droites, plutôt que le calcul entre une droite et une équation mathématique de degré supérieur.

3.2.4.2 Modélisation de la réflexion de la lumière

Pour chaque rayon lumineux arrivant sur une facette de la surface, sa direction de réflexion et son flux doivent être calculés. Dans le paragraphe § 2.3.1, les trois modes de réflexions ont été rappelés : il s'agit de la réflexion spéculaire, de la réflexion diffuse uniforme et de la réflexion quelconque, caractérisée par les variations spatiales du coefficient de luminance. Le choix d'un type de réflexion entraîne un certain nombre d'hypothèses sur la nature physique du matériau de la facette ainsi que sur son état de surface.

a. Absence de microtexture

La surface de la facette est supposée être parfaitement lisse pour tous les angles d'éclairage et pour la longueur d'onde utilisée (ici, la lumière se trouve dans le domaine visible, mais aucune hypothèse n'empêche l'utilisation du goniophotomètre virtuel pour d'autres gammes de longueur d'onde). La facette se comporte donc comme un miroir et la réflexion est du type spéculaire (§ 1.2.1.1). Pour déterminer la direction et le flux du rayon réfléchi, un seul paramètre est nécessaire : l'indice de réfraction n du matériau de la facette.

Avec ce modèle de réflexion, il y a une grande similitude entre les hypothèses précédentes et celles du modèle de l'approximation de Kirchhoff (§ 2.3.3). Comme pour ce dernier, le rayon de courbure de la surface de la facette doit donc être plus grand que la longueur d'onde λ de la lumière incidente. De plus, afin d'éviter les phénomènes de diffraction au niveau des facettes, la plus petite dimension de ces facettes doit être très supérieure à la longueur d'onde λ . Pour une facette carrée, ceci est équivalent à ce que l'aire de la facette soit plus grande que λ^2 .

b. Présence d'une microtexture

La surface de la facette présente une microtexture qui modifie le mode de réflexion de la lumière. L'échelle de cette microtexture est très inférieure à l'échelle de la macrotexture donnée par l'échantillonnage de la surface.

Dans le cas le plus simple, la facette est parfaitement diffusante en réflexion et sa BRDF⁴ est donc constante (§ 1.2.1.3). Il suffit alors d'un seul paramètre pour décrire la réflexion : c'est le facteur d'absorption de la surface. La direction du rayon réfléchi est tirée aléatoirement sur le demi espace supérieur à la facette et le flux transporté par le rayon devient proportionnel au cosinus de l'angle entre cette direction et la normale à la facette au point de réflexion.

Un modèle plus proche de la réalité consiste à définir localement les propriétés optiques de la facette par une BRDF (§ 1.2.1.4). Cette BRDF peut être donnée sous la forme de mesures expérimentales ou sous la forme d'un modèle théorique, comme le modèle de l'approximation de Kirchhoff (§ 2.3.5). Il peut paraître étonnant d'employer ici ce modèle, mais à cette échelle de texture les hypothèses qu'il utilise sont parfaitement respectées. Comme le montrent les indicatrices de diffusion de la figure 2.8, la facette renvoie plus d'énergie dans certaines directions. En pratique, le tirage du rayon réfléchi se fait aléatoirement, puis son énergie est pondérée en utilisant le coefficient de luminance.

L'utilisation d'une BRDF pour décrire les propriétés photométriques des matériaux permet également de prendre en compte la diffusion de volume (§ 2.2). Cette diffusion est très difficile à modéliser et est souvent considérée comme diffuse uniforme. Cependant, des valeurs expérimentales du coefficient de luminance intègrent naturellement cette diffusion.

3.2.5 Le récepteur

3.2.5.1 Description du récepteur

Le récepteur est un hémisphère situé au dessus du plan tangent à la surface, son centre étant confondu avec celui de la surface (figure 3.3). Le rôle du récepteur est d'enregistrer la direction \mathbf{u} et le flux ϵ des rayons réfléchis par la surface. À cette fin, il est décomposé en capteurs. Le découpage utilisé est régulier et caractérisé par un pas d'échantillonnage de 5° pour les deux angles θ_r et ϕ_r , nécessaires au repérage du centre des capteurs (le récepteur est donc divisé en $18 \times 72 = 1296$ capteurs). Quand un rayon arrive sur le récepteur, sa direction \mathbf{u} permet de calculer les valeurs des angles θ_r et ϕ_r et de déterminer le capteur qui reçoit le rayon (figure 3.10). Le flux ϵ transporté par ce rayon est additionné au flux déjà enregistré dans ce capteur.

4. Pour différencier le coefficient de luminance de la surface du coefficient de luminance des facettes, l'abréviation BRDF désignera par la suite uniquement le coefficient de luminance des facettes.

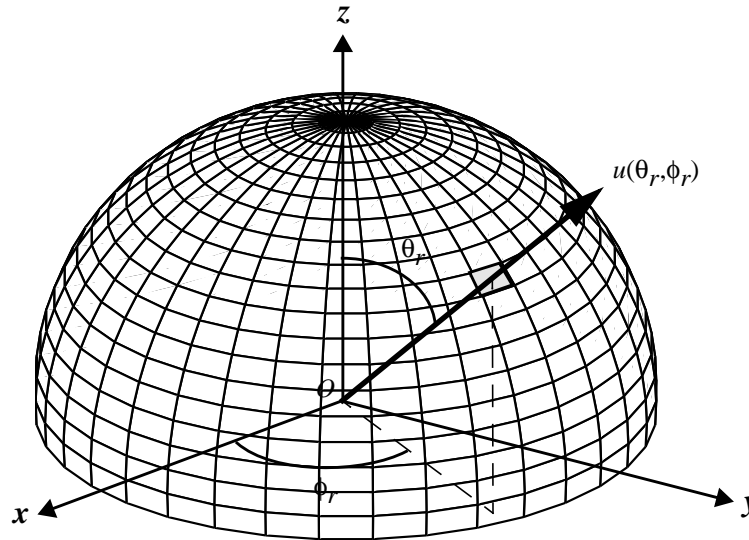


Figure 3.10 Découpage régulier du récepteur.

Une des propriétés des capteurs est de pouvoir différencier les rayons ayant subi une, deux et au moins trois réflexions. Ainsi, le goniophotomètre virtuel permet de calculer le coefficient de luminance correspondant aux réflexions simples, doubles et d'ordre supérieur à trois.

3.2.5.2 Calcul du coefficient de luminance

Au départ de la source de lumière (§3.2.3), les rayons transportent tous un flux énergétique élémentaire ε fixé à 1. Si N est le nombre de rayons lancés vers la surface, le flux total incident Φ_i reçu par la surface est donc $\Phi_i = N\varepsilon = N$. Contrairement au goniophotomètre du LCPC (§3.1), l'éclairement reçu par la surface est indépendant de l'angle d'éclairage θ_i . En effet, le nombre de rayon lancé est toujours égal à N et c'est uniquement l'échantillonnage de la source qui varie avec θ_i pour avoir une répartition uniforme des rayons sur la surface.

En arrivant sur un capteur, un rayon, qui a subi une ou plusieurs réflexions, transporte un flux énergétique $\varepsilon_r(k)$, k étant le nombre de réflexions de ce rayon sur la surface ($1 \leq k \leq 3$). Pour un capteur repéré par les angles θ_r et ϕ_r , plusieurs rayons ayant subi un nombre de réflexions différent peuvent arriver. Pour l'ordre de réflexion k , le flux total $\Phi_r(\theta_r, \phi_r, k)$ contenu par ce capteur est la somme des flux $\varepsilon_r(k)$: $\Phi_r(\theta_r, \phi_r, k) = \sum \varepsilon_r(k)$. D'après l'équation (1-11), le coefficient de luminance $q(\theta_r, \phi_r)$ est fonction des flux Φ_i et Φ_r et son expression, calculée pour chaque capteur et pour chaque ordre de réflexion, devient :

$$q(\theta_r, \phi_r, k) = \frac{\Phi_r(\theta_r, \phi_r, k)}{Nd\Omega(\theta_r, \phi_r)\cos(\theta_r)} \quad (3-1)$$

$d\Omega(\theta_r, \phi_r)$ est l'angle solide du capteur considéré. Cet angle solide n'est pas le même pour tous les capteurs, car leur surface n'est pas constante (elle est plus petite pour les capteurs proches de la normale). En raison de la symétrie de révolution du récepteur, les angles solides dépen-

dent uniquement de l'angle θ_r . Pour chaque angle θ_r , l'angle solide des capteurs correspondants est calculé en utilisant la méthode de Nusselt (annexe A.2).

Le coefficient de luminance total de la surface est donné par la relation :

$$q(\theta_r, \phi_r) = \sum_{k=1}^3 q(\theta_r, \phi_r, k)$$

Remarque :

Il existe une différence importante entre le goniophotomètre du LCPC (§ 3.1) et le goniophotomètre virtuel. En effet, pour ce dernier, la surface éclairée reste fixe par rapport à la source de lumière et c'est l'«observateur» qui se déplace autour de l'échantillon.

Il est possible de recréer fidèlement les conditions expérimentales du goniophotomètre du LCPC, c'est-à-dire de fixer la direction d'observation ϕ_r et de déplacer la source autour de l'échantillon. Mais, ceci se fait au détriment du temps de calcul, car cela nécessite que pour chaque direction d'éclairage la totalité des rayons est relancée.

Cependant, les surfaces routières étant relativement isotropes (§ 1.3.1), les différences entre les deux types de simulations doivent rester théoriquement faibles. D'ailleurs, cette hypothèse pourra être vérifiée par la comparaison de données mesurées avec les résultats de simulations.

3.2.5.3 Utilisation de la symétrie du coefficient de luminance

Comme pour les mesures réelles faites avec le goniophotomètre du LCPC (§ 3.1), le coefficient de luminance des surfaces est supposé être symétrique par rapport au plan d'éclairage. La répartition spatiale du coefficient de luminance est donc identique de part et d'autre de ce plan d'éclairage, ceci quel que soit l'ordre de réflexion k . Le coefficient de luminance calculé est déterminé en moyennant les coefficients de luminance contenus par les deux capteurs de même angle θ_r et symétriques par rapport au plan d'éclairage :

$$q(\theta_r, \phi_r, k) = \frac{q(\theta_r, \phi_r, k) + q(\theta_r, 360^\circ - \phi_r, k)}{2}$$

Cette moyenne permet de gagner en précision sur les calculs. En effet, le nombre de rayons arrivant sur chaque capteur est multiplié par 2. Ceci est équivalent à une simulation pour laquelle 2 fois plus de rayons auraient été lancés, ce qui demanderait approximativement 2 fois plus de temps de calcul.

L'hypothèse de la symétrie du coefficient de luminance de la surface n'est pas toujours vérifiée. Par exemple, si la surface présente un sens d'usure très marqué, la réflexion de la lumière peut avoir des directions privilégiées. Pour ce type de surface, le résultat donné par le goniophotomètre virtuel sera alors erroné.

3.3 Validation de la méthode

Dans le paragraphe 3.2, une description complète des caractéristiques du goniophotomètre virtuel a été faite. Lors du calcul du coefficient de luminance d'une surface, de nombreux paramètres peuvent être modifiés, en particulier le nombre de rayons à lancer. L'objectif de la validation est donc, d'une part, de fixer ou du moins d'estimer ce nombre pour avoir les meilleurs résultats possibles. Dans une seconde partie, pour des profils particuliers de surface, les résultats du goniophotomètre virtuel seront comparés aux prévisions du modèle de l'approximation de Kirchhoff (§ 2.3.5).

3.3.1 Influence du nombre de rayons lancés

Le nombre de rayons lancés pour le calcul du coefficient de luminance d'une surface est un paramètre important de la qualité des résultats. La convergence vers le coefficient de luminance «vrai» est obtenue théoriquement en lançant un nombre infini de rayons. Dans cette étude, l'objectif est de déterminer le nombre minimum de rayons à lancer pour que l'écart entre le coefficient de luminance «vrai» et le coefficient de luminance calculé soit dans une limite acceptable.

3.3.1.1 La méthode utilisée

Pour les tests de convergence, six simulations sont calculées avec un nombre croissant de rayons (tableau 3.1).

Simulation ou Tirage	Nombre total de rayons lancés	Nombre moyen de rayons par facette ^a
I	$250 \cdot 10^3$	0,24
II	$1 \cdot 10^6$	0,95
III	$4 \cdot 10^6$	3,82
IV	$16 \cdot 10^6$	15,3
V	$64 \cdot 10^6$	61,1
VI	$256 \cdot 10^6$	244,6

Tableau 3.1 : Nombre de rayons lancés pour les 6 simulations testées.

a. Pour une surface échantillonnée en 1024×1024 points, ce qui définit 1023×1023 facettes.

Pendant les simulations, la surface étudiée est ramenée à un carré unitaire (§ 3.2.2.2). Un nombre de rayons par unité de surface peut être défini, et il est égal au nombre total de rayons

lancés. En revenant à la taille réelle de l'échantillon étudié, ceci n'est plus vérifié. Dans le cas des échantillons d'aire importante, le nombre de rayons par unité de surface peut devenir faible. Pour s'assurer que l'éclairement de l'échantillon est toujours uniforme, l'utilisateur devra donc adapter le nombre de rayons total de rayons lancés à la taille de l'échantillon.

La comparaison entre le coefficient de luminance calculé q , résultat d'une des simulations, et le coefficient de luminance de référence q_{ref} se fait à partir des écarts relatifs pris pour chaque couple d'angles d'observation (θ_r, ϕ_r) , pour un angle d'éclairage θ_i fixé. Cet écart relatif est défini par la relation :

$$\Delta q(\theta_r, \phi_r) = \frac{q(\theta_r, \phi_r) - q_{ref}(\theta_r, \phi_r)}{q_{ref}(\theta_r, \phi_r)}$$

Par la suite, la moyenne, l'écart-type et le maximum des écarts relatifs $\Delta q(\theta_r, \phi_r)$ sont déterminés sur l'ensemble des couples (θ_r, ϕ_r) sauvegardés pour chaque angle d'éclairage, soit 266 valeurs⁵.

Pour effectuer les tests de convergence, deux types de surface ont été utilisés : une surface plane parfaitement diffusante, et une surface rugueuse avec un comportement spéculaire. La surface plane permet de comparer les résultats à un modèle théorique parfaitement connu. Comme toutes les directions de l'espace sont équiprobables, le fonctionnement du récepteur est également testé pour toutes les directions d'observation. Par contre, avec la surface rugueuse, les conditions «expérimentales» sont plus proches des utilisations futures du gonio-photomètre. Mais dans ce cas, le coefficient de luminance «vrai» n'est pas connu. La meilleure approximation qui peut être obtenue est fournie par la simulation VI calculée avec le plus grand nombre de rayons. C'est donc la simulation VI qui par la suite sert de coefficient de luminance de référence.

3.3.1.2 Cas d'une surface plane

Comme la surface étudiée est plane et que ses facettes possèdent la BRDF d'un diffuseur parfait, le coefficient de luminance résultant est celui d'un diffuseur parfait. Dans ce cas très simplifié, le coefficient de luminance est constant suivant les directions d'observation et sa valeur vaut $q = 1/\pi$ (§ 1.2.1.3). En outre, il est indépendant de l'angle d'éclairage et pour les calculs un éclairage normal a été choisi. Sur la figure 3.11, la moyenne, l'écart-type et le maximum des écarts relatifs Δq définis précédemment sont représentés pour chaque simulation. Pour faciliter la lecture de ces résultats, ils sont exprimés en pour cent.

Dans l'ensemble, le coefficient de luminance de la surface est toujours identifiable à un diffuseur parfait. En effet, le plus mauvais résultat, obtenu avec la simulation I, donne un écart moyen avec la théorie de 3%. Mais, si le nombre de rayons lancés est trop faible, le résultat obtenu est très bruité, ce qui se traduit par un écart-type grand (cas des simulations I et II).

5. Ce nombre est inférieur au nombre total de capteurs du récepteur car tous les résultats ne sont pas enregistrés. Seules les directions d'observation (θ_r, ϕ_r) identiques à celles (α, β) du gonio-photomètre du laboratoire sont prises en compte (voir § 3.1). Comme l'angle ϕ_i est égal à 0° (voir note 6 du § 2.3.5), les relations entre les angles de la CIE et les angles des coordonnées sphériques sont $\theta_r = 90^\circ - \alpha$ et $\phi_r = 180^\circ - \beta$.

Dans ces deux cas, les écarts maximums sont également importants puisque supérieurs à 20%. À l'inverse, pour les simulations V et VI, la moyenne, l'écart-type et le maximum des écarts sont faibles et n'évoluent plus avec le nombre de rayons lancés. Quant aux résultats des simulations III et IV, ils sont intermédiaires entre ceux des simulations I et II, et ceux des simulations V et VI.

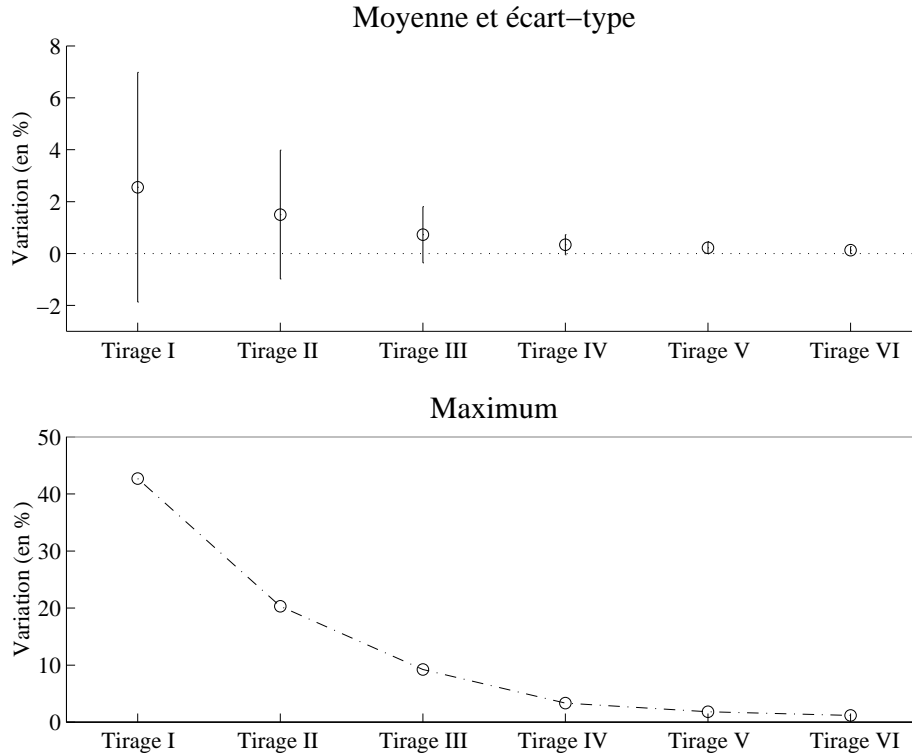


Figure 3.11 Évolution de la moyenne, de l'écart-type et du maximum des écarts relatifs $\Delta q(\theta_r, \phi_r)$ pour différents tirages.

Pour choisir entre les simulations III et IV, il faut tenir compte du paramètre temps de calcul. En effet, le temps de calcul d'une simulation dépend d'une façon linéaire du nombre de rayons lancés. Le passage de la simulation III à la simulation IV demande donc un temps de calcul quatre fois plus long pour une diminution par un facteur 2 des écarts relatifs. Les résultats de la simulations III sont très satisfaisants, mais les variations peuvent sembler trop importantes pour le cas idéal étudié. L'étude de la convergence sur une surface rugueuse permettra de choisir entre les simulations III et IV.

3.3.1.3 Cas d'une surface rugueuse

La surface est générée numériquement en utilisant une loi de distribution des hauteurs normale et une fonction d'autocorrélation gaussienne (cf. annexe A.1). La rugosité de cette surface est caractérisée par son écart-type des hauteurs σ et sa longueur de corrélation T . Pour les tests de convergence, deux types de rugosité sont pris en compte : d'une part, une faible rugosité $r = 0,1$ ($\sigma = 1$ mm et $T = 10$ mm) et d'autre part, une forte rugosité $r = 0,5$ ($\sigma = 1$ mm

et $T = 2 \text{ mm}$). Le matériau de ces deux surfaces est supposé être un matériau au comportement purement spéculaire (son indice de réfraction est $n = 1,5$ pour $\lambda = 0,555 \text{ }\mu\text{m}$).

Contrairement à l'étude de la surface plane, plusieurs angles d'éclairages θ_i sont utilisés. En effet, comme les surfaces sont rugueuses, leur coefficient de luminance dépend fortement de l'angle θ_i , ce qui peut influencer la qualité des résultats obtenus. L'ensemble des incidences possibles est balayé avec les valeurs suivantes de θ_i : 0° , 20° , 40° , 60° et 80° .

Les résultats obtenus pour les deux surfaces rugueuses sont présentés sur les figures 3.12 et 3.13. Dans l'ensemble, ils sont comparables à ceux obtenus pour la surface plane parfaitement diffusante : il y a une diminution des écarts relatifs avec le nombre de rayons lancés.

Toutefois, la rugosité de la surface a une influence sur ces écarts. Pour la surface de forte rugosité ($r = 0,5$), les écarts sont homogènes pour un tirage donné, c'est-à-dire qu'ils sont indépendants de l'angle d'éclairage θ_i . À l'inverse, pour la surface de faible rugosité ($r = 0,1$), il y a une dispersion importante des résultats en fonction de l'angle d'éclairage pour un même tirage. Ceci s'explique par les différences importantes de la forme du coefficient de luminance en fonction de l'angle d'éclairage. Pour la surface très rugueuse, cette forme est pratiquement toujours la même et le coefficient de luminance est, comme pour un diffuseur parfait, constant. Par contre, pour la surface peu rugueuse, le coefficient de luminance se caractérise par un pic dans la direction de specularité. Ce pic, qui contient la majorité des rayons réfléchis, est d'autant plus important que l'angle d'éclairage θ_i est rasant.

Pour les deux surfaces, le choix de la meilleure simulation doit se faire entre les tirages III et IV. Pour le tirage III, les écarts-types sont de l'ordre de 2% et les maximums inférieurs à 10%, ce qui est très bon comparativement aux écarts tolérés dans les mesures en photométrie. Le gain en précision apporté par le tirage IV n'est donc pas significatif alors que les temps de calculs sont quatre fois plus long.

Par la suite, le nombre de rayons lancés pour une simulation est donc fixé à 4.10^6 .

Remarque :

Le temps de calcul dépend du nombre de rayons lancés, mais aussi de deux autres facteurs : l'angle d'éclairage θ_i et le nombre de réflexions multiples. Dans les deux cas, le temps de calcul est augmenté car le suivi d'un rayon se fait sur une plus grande distance. En effet, pour les rayons rasants, leur hauteur au dessus de la surface est petite : ils parcourent un chemin plus long dans la boîte englobante du terrain. Le nombre de facettes pour lesquelles l'intersection avec le rayon doit être testé est donc plus grand. Il en est de même pour les rayons qui se réfléchissent plusieurs fois sur la surface. Cependant, ces deux facteurs ne s'additionnent pas, car pour les angles d'éclairage rasants la proportion de réflexions multiples diminue. Ce type de réflexion est important pour les angles d'éclairage proche de la normale et pour les surfaces très rugueuses.

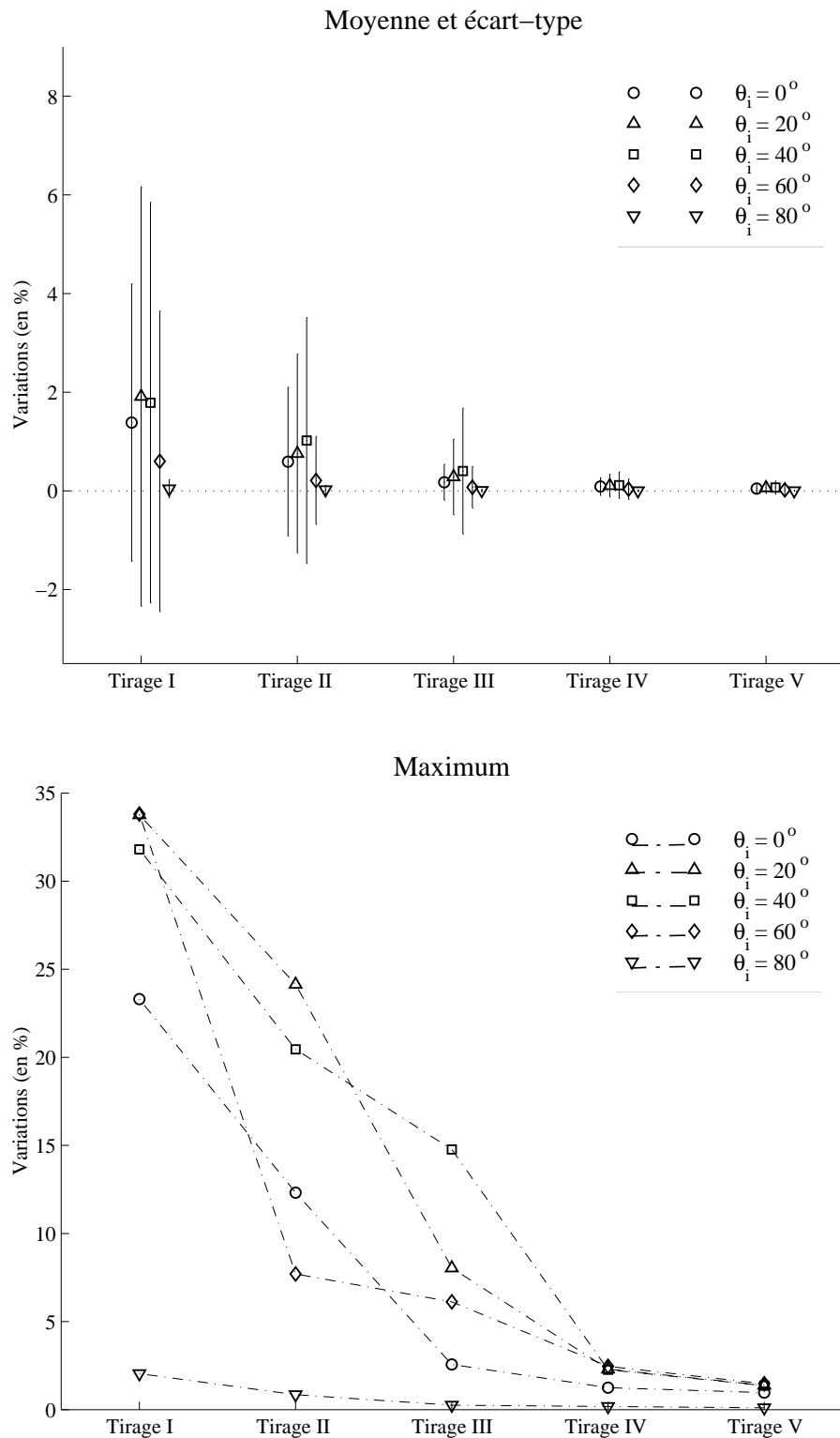


Figure 3.12 Évolution des moyenne, écart-type et maximum des écarts relatifs entre les simulations I à V et la simulation VI pour différentes incidences θ_i et pour une rugosité $r = 0,1$.

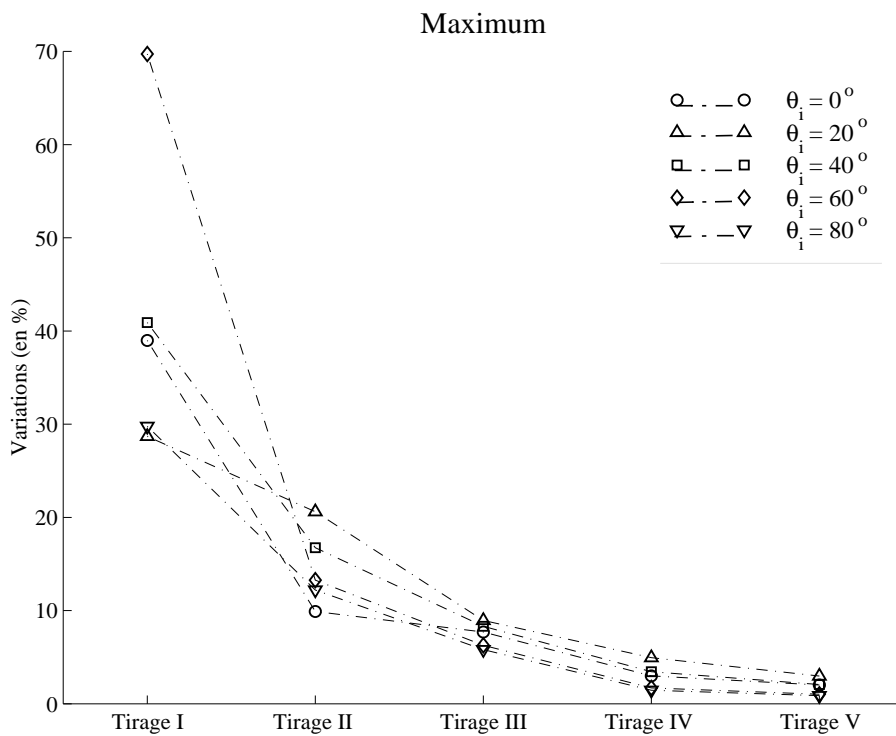
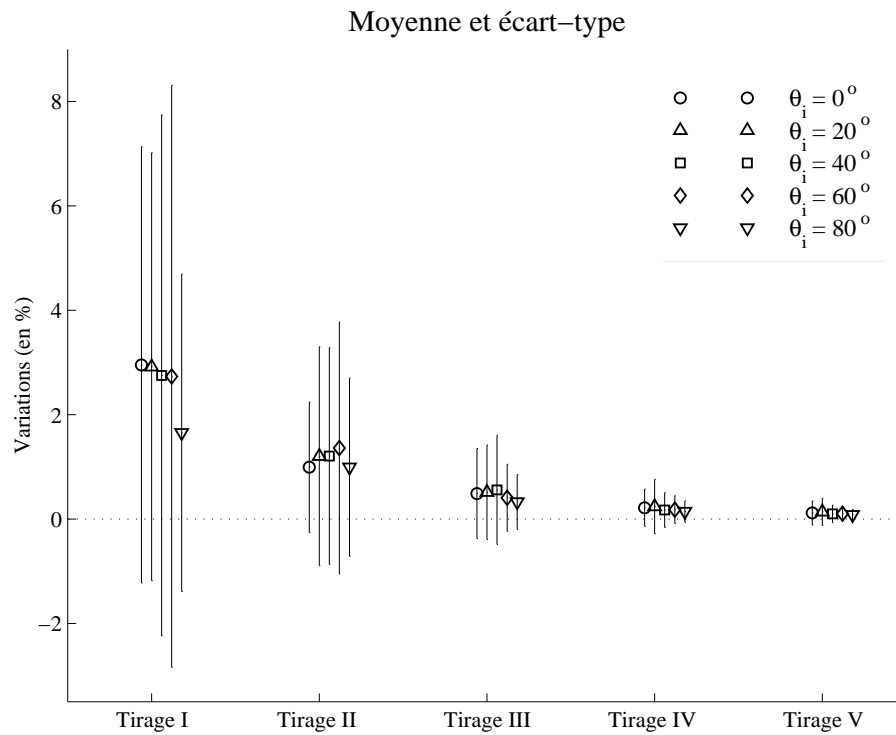


Figure 3.13 Évolution des moyenne, écart-type et maximum des écarts relatifs entre les simulations I à V et la simulation VI pour différentes incidences θ_i et pour une rugosité $r = 0,5$.

3.3.2 Comparaison entre les simulations et les modèles théoriques

Pour cette validation, les résultats donnés par le goniophotomètre virtuel sont comparés aux prévisions du modèle de l'approximation de Kirchhoff (§2.3.5). Le coefficient de luminance de cet échantillon est calculé en conservant les hypothèses de ce modèle :

- les réflexions sur les facettes sont purement spéculaires (l'indice de réfraction n est fixé à 1,5),
- la surface est très rugueuse $g \gg 1$ (pour $\lambda = 0,555 \mu\text{m}$)
- seules les réflexions simples sont prises en compte.

Au total, 16 échantillons ont été générés (*cf.* annexe A.1). Le coefficient de luminance q présenté sur les figures 3.14 à 3.16 est la moyenne des coefficients de luminance de ces seize échantillons. Sur ces courbes, plutôt que q , c'est le produit de q par le cosinus de l'angle d'observation θ_r qui est tracé. Ce produit, proportionnel à l'intensité, permet de mettre en valeur un pic qui s'étale autour de la direction de specularité. Toutes les courbes sont tracées dans le plan d'éclairage : les valeurs négatives de θ_r correspondent à $\phi_r = 0^\circ$ (plan de rétrodiffusion) et les valeurs positives de θ_r à $\phi_r = 180^\circ$ (plan de specularité). Le produit $q \cdot \cos(\theta_r)$ a été calculé pour différents angles d'éclairage θ_i , ainsi que les prévisions du modèle de l'approximation de Kirchhoff données par l'équation (2-30) avec l'utilisation du modèle de Beckmann-Smith (équations (2-24) et (2-27)). Les écarts relatifs «simulation-modèle», exprimés en pour cent, sont également représentés sur ces graphiques et doivent être lus avec l'axe de droite. Trois rugosités ont été utilisées pour cette validation. Dans tous les cas l'écart-type des hauteurs σ est de 1 mm et la longueur de corrélation T vaut 5 mm, 10 mm et 15 mm, ce qui donne respectivement comme rugosité pour les surfaces : $r = 0,2$ (fig. 3.14), $r = 0,1$ (fig. 3.15) et $r = 0,07$ (fig. 3.16).

D'une manière générale, pour les angles d'éclairage θ_i proche de la normale ($\theta_i = 0^\circ$ et $\theta_i = 40^\circ$), et pour les trois rugosités, il y a une bonne adéquation entre les résultats du goniophotomètre virtuel et les prévisions du modèle de Kirchhoff. Les écarts absolus observés sont inférieurs à 10% pour les directions d'observation distantes de moins de 30° du pic de specularité. En revanche, ces écarts peuvent devenir importants (parfois supérieurs à 50%) pour les autres directions d'observation. Toutefois, dans ce cas, les valeurs de $q \cdot \cos(\theta_r)$ sont peu significatives par rapport au maximum observé.

Pour les angles d'éclairage rasants ($\theta_i = 60^\circ$ et $\theta_i = 80^\circ$), les résultats sont beaucoup plus sensibles à la rugosité r de la surface. Pour la surface la plus rugueuse ($r = 0,2$), les écarts augmentent avec les angles d'éclairage et d'observation. En valeur absolue, ils deviennent même toujours supérieurs à 40% pour $\theta_i = 80^\circ$. Pour les rugosités plus petites ($r = 0,1$ et $r = 0,07$), les écarts suivent le même comportement, mais leurs valeurs sont beaucoup moins importantes.

Ces résultats sont en accord avec les limitations du domaine de validité du modèle de Kirchhoff donné au paragraphe 2.3.3.3. En effet, pour les grandes longueurs de corrélation T , c'est-à-dire les faibles rugosités r , les écarts entre les simulations et le modèle sont faibles puis augmentent avec les angles d'éclairage et d'observation. À l'inverse, pour les petites valeurs de T , le domaine de validité du modèle de Kirchhoff se rétrécit et il se limite alors aux incidences θ_i proche de la normale.

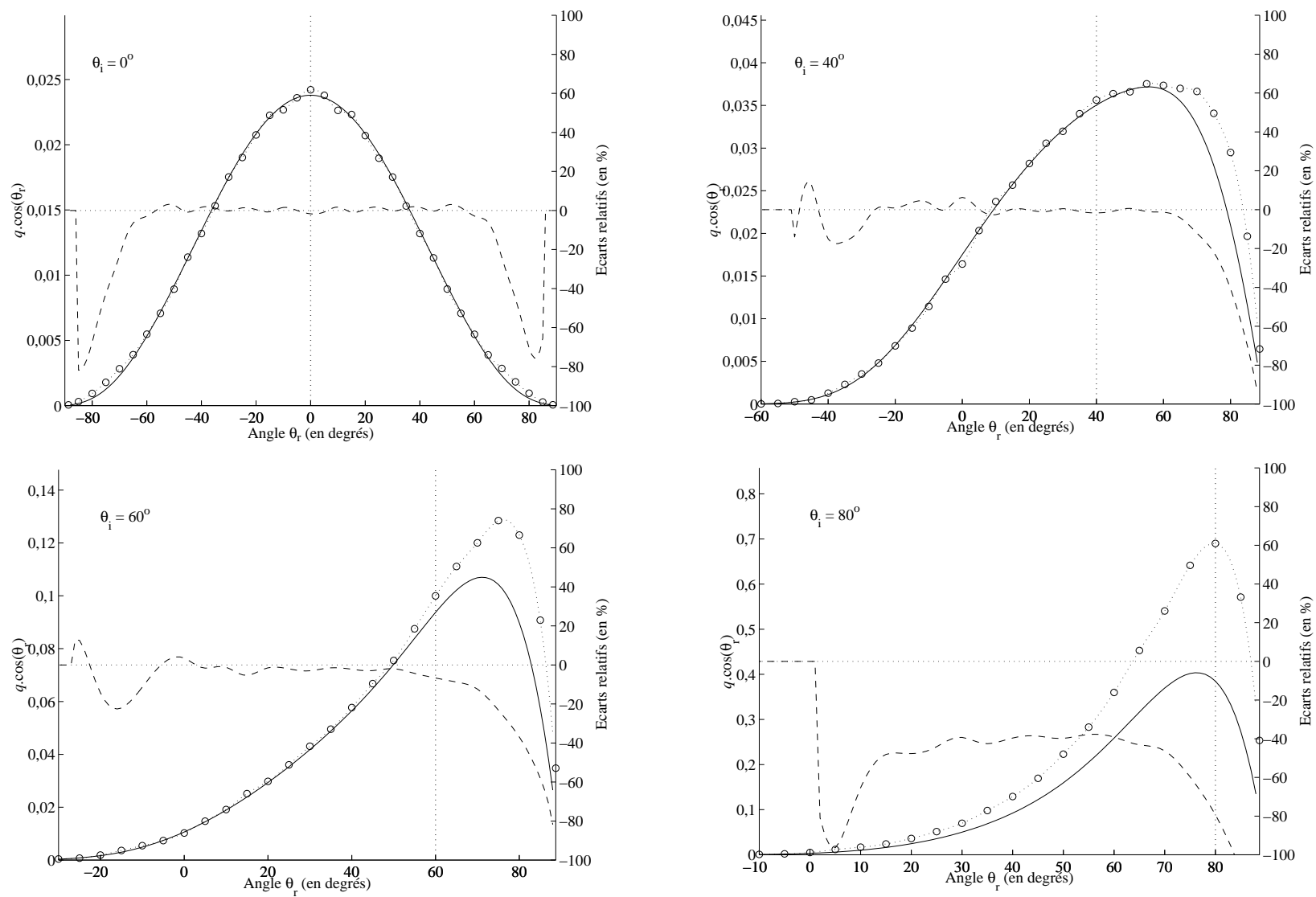


Figure 3.14 Comparaison entre les simulations (cercles) et le modèle de Kirchhoff (trait continu) pour différents angles d'éclairage θ_i et une de rugosité $r = 0,2$. Les écarts relatifs sont représentés par les tirets (axe de droite).

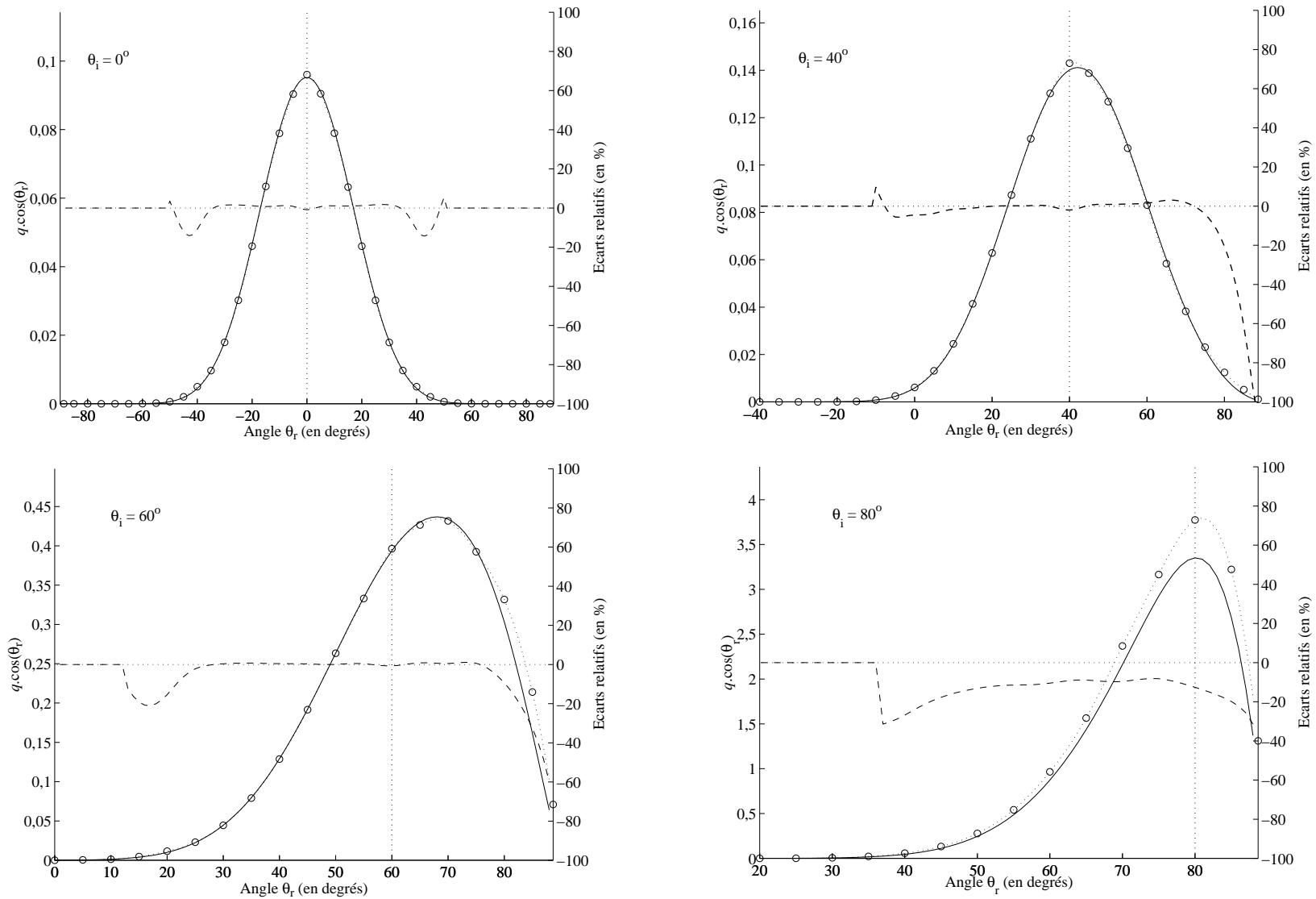


Figure 3.15 Comparaison entre les simulations (cercles) et le modèle de Kirchhoff (trait continu) pour différents angles d'éclairage θ_i et une rugosité $r = 0,1$. Les écarts relatifs sont représentés par les tirets (axe de droite).

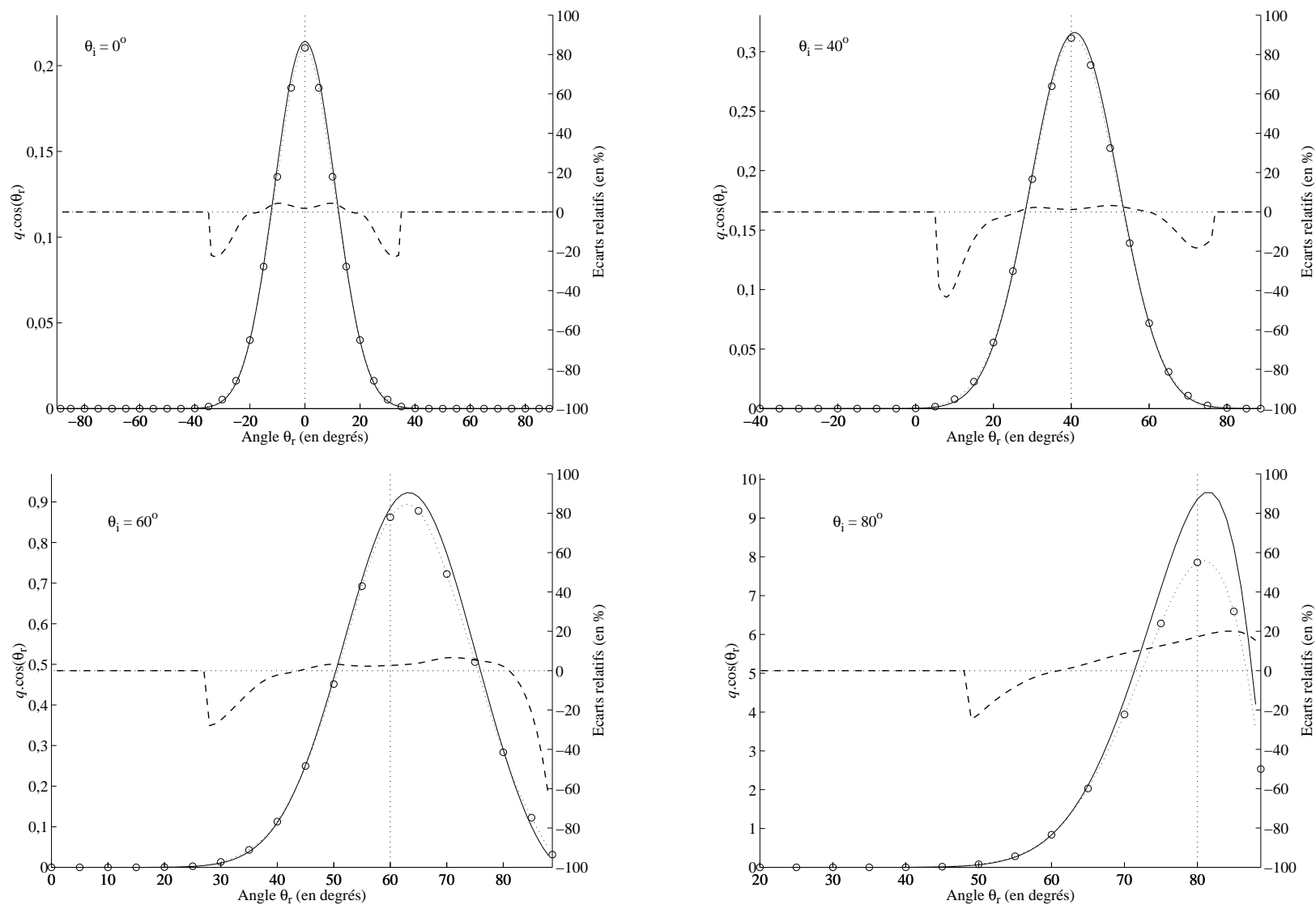


Figure 3.16 Comparaison entre les simulations (cercles) et le modèle de Kirchhoff (trait continu) pour différents angles d'éclairage θ_i et une de rugosité $r = 0,07$. Les écarts relatifs sont représentés par les tirets (axe de droite).

Remarque :

Dans la plupart des simulations, des écarts importants apparaissent pour les directions d'observation éloignées de la direction de spécularité (c'est-à-dire, pour les valeurs très petites du coefficient de luminance). Ces écarts s'expliquent par le nombre peu élevé de rayons reçus par ces capteurs, ce qui entraîne un bruit important. Comme le montre les courbes de la figure 3.12, les variations de ce bruit sont de l'ordre de 10% et elles varient avec la rugosité de la surface et avec l'angle d'éclairage θ_i .

3.4 Conclusion

Les résultats obtenus pour les surfaces aléatoires à «profil gaussien» sont très satisfaisants. Leur comparaison avec les prévisions du modèle de l'approximation de Kirchhoff (§2.3.5) permettent d'affirmer que le goniophotomètre virtuel est capable de simuler la réflexion de la lumière par ce type de surface.

Pour calculer le coefficient de luminance d'une surface, les données nécessaires sont :

- le profil géométrique de la surface donné par un champ d'altitude,
- les caractéristiques photométriques du ou des matériaux de la surface
- la nature du matériau de chacune des facettes de la surface.

Que ce soit pour la représentation de la surface (§3.2.4.1) ou du mode de réflexion des rayons (§3.2.4.2), les hypothèses utilisées par le goniophotomètre virtuel sont peu contraignantes, et seulement quelques cas particuliers de profils de surfaces ne peuvent pas être représentés. Il semble donc possible de pouvoir étendre l'utilisation du goniophotomètre virtuel à d'autres types de surfaces, comme par exemple des profils de revêtements routiers.

En résumé, le goniophotomètre virtuel n'a aucune contrainte sur la distribution des hauteurs de la surface. C'est également le cas de la plupart des modèles théoriques pris dans leur formulation générale, mais par rapport à ces modèles, le goniophotomètre virtuel présente des possibilités très intéressantes :

- définir plusieurs modèles de description des propriétés optiques des facettes,
- définir plusieurs matériaux,
- prise en compte des effets de «masquage / ombrage»,
- prise en compte des réflexions multiples.

Après une simulation, l'utilisateur devra toujours avoir un regard critique sur les résultats obtenus, en particulier pour s'assurer de la convergence des résultats.

CHAPITRE 4

Application du goniophotomètre virtuel aux surfaces synthétiques

L'intérêt du goniophotomètre virtuel est de pouvoir calculer à volonté le coefficient de luminance d'une surface en contrôlant indépendamment plusieurs paramètres, comme les caractéristiques du profil de la surface de l'échantillon ou les propriétés photométriques du matériau de cette surface.

Dans ce chapitre, les surfaces sont générées numériquement en utilisant une loi de distribution des hauteurs normale et une fonction d'autocorrélation gaussienne (par la suite, ces surfaces sont appelées «surfaces à profil gaussien»). Pour ce type de surface, trois types d'analyses sont effectuées :

- l'étude des réflexions multiples (§4.1),
- l'étude des effets de «masquage / ombrage» (§4.2),
- l'étude de l'influence des caractéristiques photométriques des matériaux (§4.3).

À chaque fois, plusieurs rugosités de surface et l'ensemble des directions d'éclairage et d'observation sont étudiés. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre et d'analyser les différents phénomènes physiques de la réflexion de la lumière par les surfaces rugueuses. Il permet entre autre d'apporter de nouvelles données pour tenter d'améliorer les modèles théoriques de la réflexion présentés au chapitre 2.

4.1 Étude des réflexions multiples

Le goniophotomètre virtuel pouvant différencier le nombre de réflexions des rayons (*cf.* paragraphe 3.2.5), il permet d'avoir accès aux coefficients de luminance dus, respectivement, aux réflexions simples, doubles et d'ordre supérieur. Dans cette partie, cette propriété est utilisée pour étudier deux aspects des réflexions multiples :

- leur proportion relative par rapport au nombre total de rayons réfléchis par une surface rugueuse,
- la distribution spatiale du coefficient de luminance associé à chaque ordre de réflexion.

Le recoupement de ces deux études permet par la suite de vérifier que si le nombre de réflexions multiples est grand, cela ne signifie pas forcément que leur contribution au coefficient de luminance total de la surface est importante.

Pour cette étude, des «surfaces à profil gaussien» de six rugosités ont été utilisées. Pour chacune de ces surfaces, le coefficient de luminance est calculé pour des angles d'éclairage θ_i égaux à 0° , 20° , 40° , 60° et 80° . En outre, comme l'énergie et la direction des rayons réfléchis dépendent des propriétés optiques du matériau de la surface, deux cas sont analysés :

- le cas où le matériau est spéculaire (§4.1.1),
- le cas où le matériau est parfaitement diffusant (§4.1.2).

Ainsi, tous les paramètres, qui sont susceptibles d'avoir une influence sur les caractéristiques des réflexions multiples, sont étudiés.

4.1.1 Cas où le matériau est spéculaire

Le matériau des facettes est ici supposé purement spéculaire avec un indice de réfraction n égal à 1,5. Les hypothèses utilisées dans les simulations sont donc identiques à celle du modèle de l'approximation de Kirchhoff présenté au paragraphe 2.3.3. Or, dans ce modèle, seules les réflexions simples sont prises en compte. Les réflexions multiples sont supposées contribuer à la composante diffuse uniforme q_{du} du coefficient de luminance de la surface. Dans la plupart des cas, le modèle permettant de décrire q_{du} est alors du type lambertien (§2.2). L'intérêt de cette étude est donc de vérifier les hypothèses du modèle de Kirchhoff et d'apporter de nouvelles informations sur les réflexions multiples.

Dans un premier temps, le nombre de réflexions simples est étudié en fonction de la rugosité et de l'angle d'éclairage θ_i . Ce nombre de réflexions est exprimé en pour cent du nombre total de rayons réfléchis par la surface. Sur les courbes de la figure 4.1, il apparaît nettement que la rugosité de la surface et l'angle d'éclairage θ_i , ont une influence importante sur le nombre de réflexions simples.

Trois types de comportement sont observés :

- Pour les surfaces très rugueuses ($r = 1$ et $r = 0,5$), le nombre de réflexions simples augmente fortement entre un éclairage normal et un éclairage rasant. Cela est d'autant plus vrai que la surface est rugueuse.
- Pour les surfaces peu rugueuses ($r = 0,1$ et $r = 0,07$), les réflexions simples représentent à elles seules toutes les réflexions pour les incidences inférieures à environ 60° . Pour les incidences plus grandes, il existe un nombre limité de réflexions multiples.
- Pour les surfaces de rugosité intermédiaire ($r = 0,25$ et $r = 0,2$), le nombre de réflexions simples diminue avec θ_i pour les incidences inférieures à 60° . Puis ce nombre augmente à nouveau pour les incidences plus grandes. Cependant, ces variations sont assez faibles puisque le minimum de réflexions simples obtenu pour $\theta_i = 60^\circ$ est de l'ordre de 85%.

Pour toutes les rugosités, le nombre de réflexions simples tend vers une même limite d'environ 90% pour θ_i valant 80° .

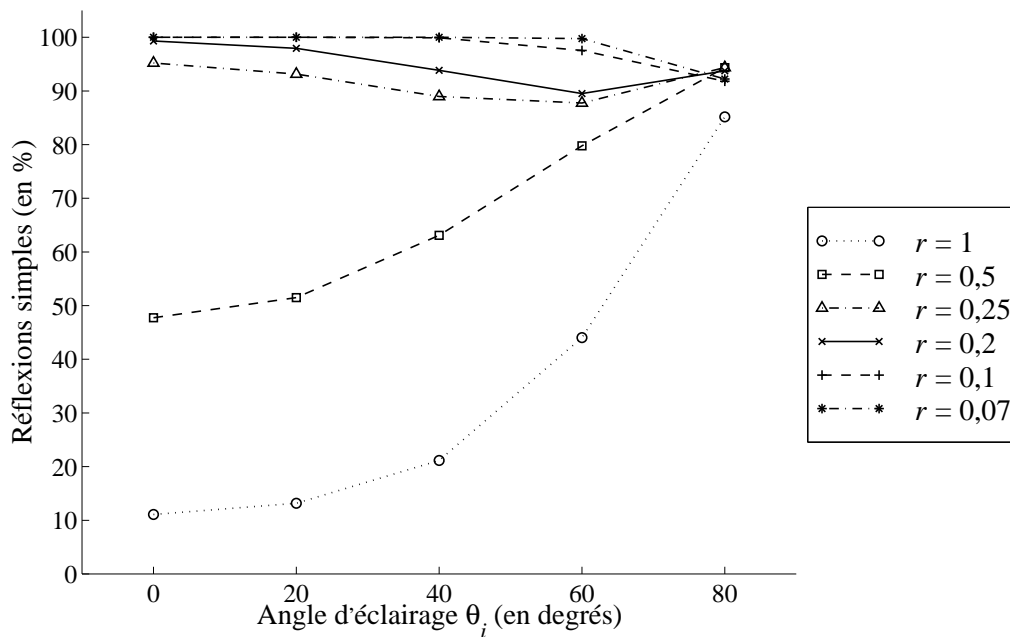


Figure 4.1 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).

Les résultats obtenus pour les proportions des réflexions simples expliquent en partie les limites du domaine de validité du modèle de Kirchhoff (§2.3.3.4). L'influence de la rugosité apparaît clairement, car plus la surface est rugueuse, plus le nombre de réflexions multiples augmente. Le modèle de Kirchhoff surestime alors la quantité d'énergie réfléchi par la surface. Les grandes rugosités ($r = 1$, $r = 0,5$ et $r = 0,25$), qui conduisent aux erreurs les plus importantes, sont donc exclues du domaine de validité. Pour les autres rugosités ($r = 0,2$, $r = 0,1$ et $r = 0,07$), l'angle d'éclairage θ_i intervient également, car les incidences rasantes

diminuent le nombre de réflexions simples. À nouveau, le modèle de Kirchhoff surestime l'énergie réfléchie. Cependant, dans le cas des incidences les plus rasantes, ces erreurs sont partiellement corrigées par l'emploi du coefficient de «masquage / ombrage» (§2.3.4).

La figure 4.1 a montré que les réflexions multiples représentent, suivant la rugosité de la surface, une part non négligeable des réflexions. Avec la figure 4.2, les pourcentages respectifs des réflexions doubles et d'ordre supérieur sont maintenant étudiés. Pour les surfaces de faible rugosité ($r \leq 0,25$), les courbes des réflexions doubles sont approximativement le complément à 100 des courbes des réflexions simples (fig. 4.1). Cela est confirmé par les pourcentages des réflexions d'ordre supérieur qui sont toujours inférieurs à 5%. Seule la surface la plus rugueuse, $r = 1$, et dans une moindre mesure celle de rugosité $r = 0,5$ ont un comportement différent. Pour ces deux surfaces, le nombre de réflexions d'ordre supérieur n'est pas négligeable, en particulier pour les incidences proches de la normale. Le nombre de réflexions d'ordre supérieur à trois est très important uniquement pour la surface de rugosité $r = 1$ et pour les incidences proches de la normale. Dans les autres cas, elles restent limitées et sont inférieures à 10%.

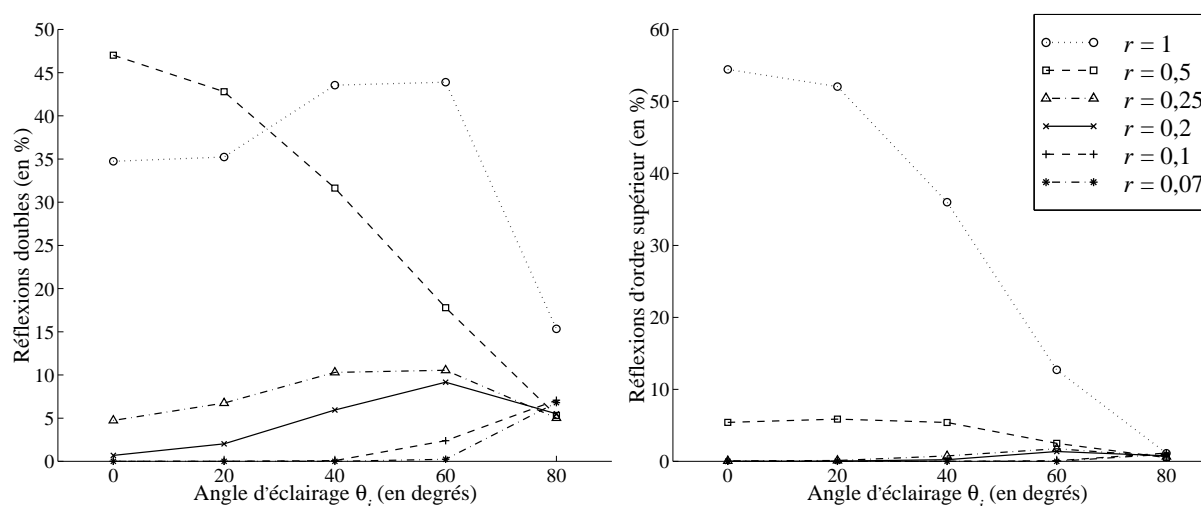


Figure 4.2 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i .

Pour les deux surfaces très rugueuses ($r = 1$ et $r = 0,5$), les réflexions doubles représentent une part essentielle des réflexions. La question qui se pose est de savoir si elles sont également importantes en terme d'énergie réfléchie par la surface. Pour y répondre, les coefficients de luminance dus respectivement aux réflexions simples, doubles et d'ordre supérieur sont comparés à l'aide des figures 4.3 et 4.4.

Les coefficients de luminance sont tracés pour les incidences θ_i de 0° , 40° et 60° , pour lesquelles le nombre de réflexions doubles est au moins supérieur à 20%. Pour mieux apprécier la forme de la distribution spatiale de l'énergie réfléchie, le coefficient de luminance (multiplié par le cosinus de l'angle d'observation θ_r) est représenté en coordonnées polaires. L'ensemble de ces courbes montrent que les résultats diffèrent suivant l'angle d'éclairage θ_i et la rugosité r de la surface.

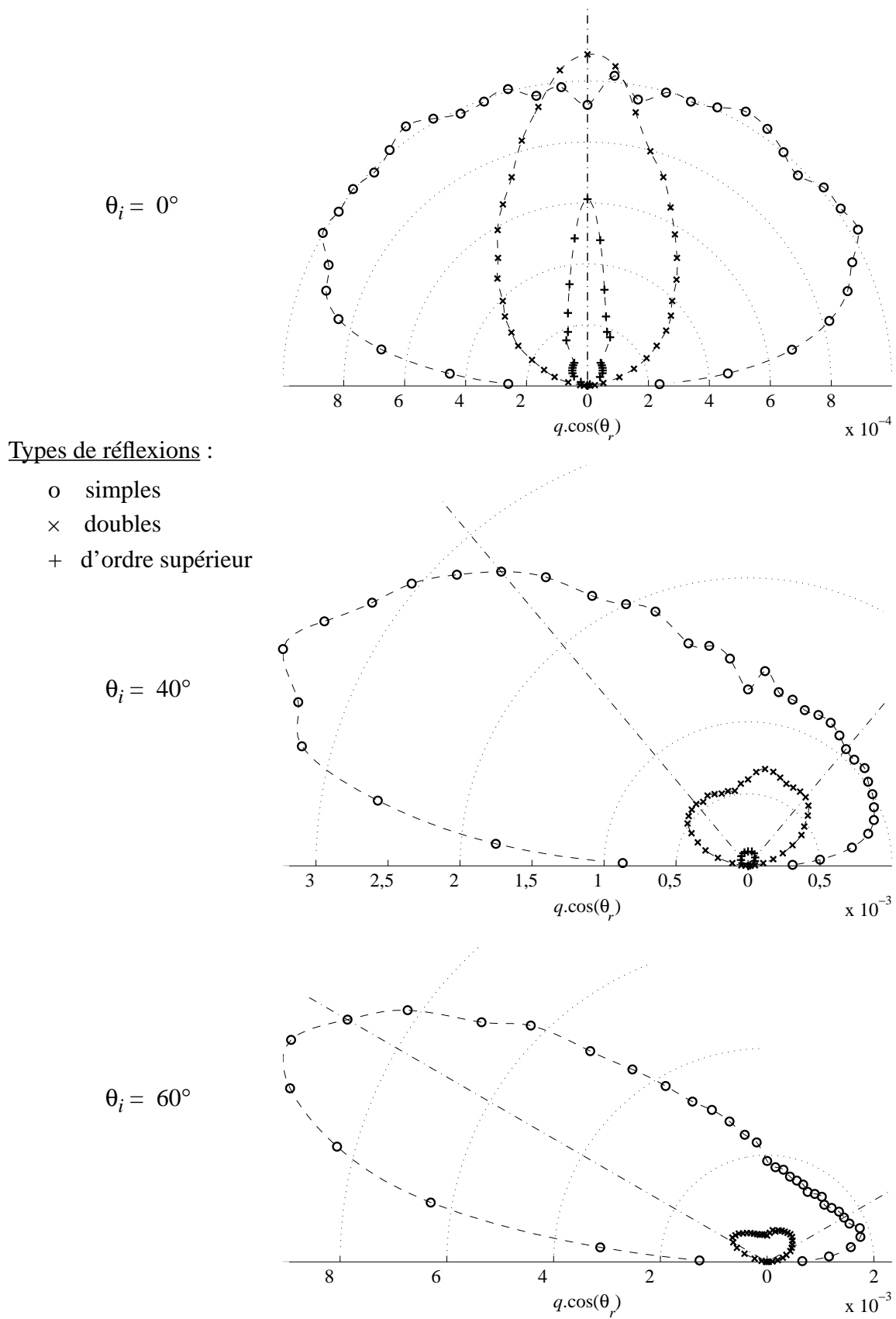
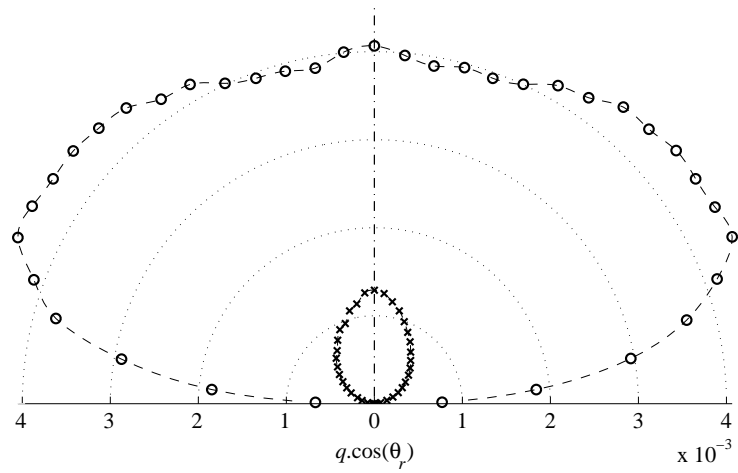


Figure 4.3 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau spéculaire et pour $r = 1$.

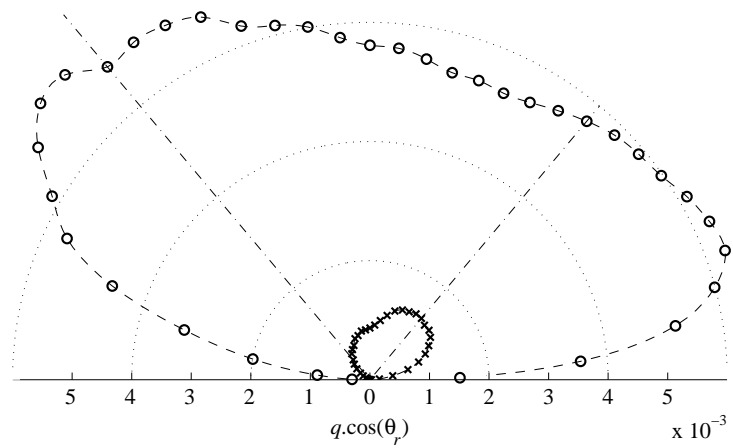
$\theta_i = 0^\circ$



Types de réflexions :

- o simples
- x doubles

$\theta_i = 40^\circ$



$\theta_i = 60^\circ$

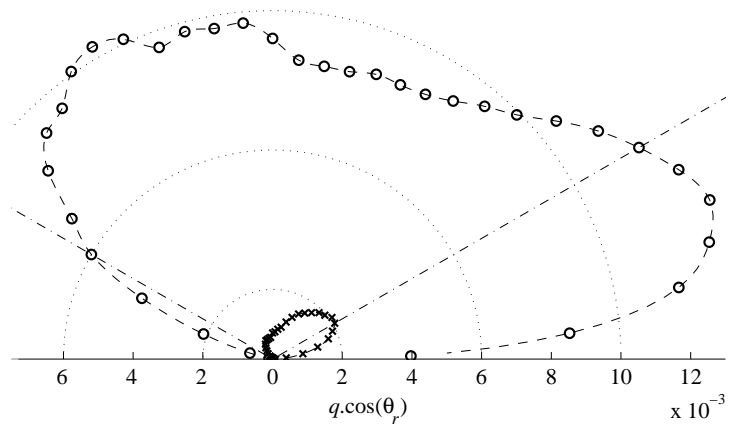


Figure 4.4 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau spéculaire et pour $r = 0,5$.

Sous un éclairage normal ($\theta_i = 0^\circ$), la distribution des réflexions simples est identique pour les deux rugosités et elle ressemble approximativement à celle d'un diffuseur parfait. Cependant, il existe un facteur 4 entre les valeurs des coefficients de luminance de ces deux surfaces. Pour les réflexions doubles, leurs distributions sont du type spéculaire et forment un lobe autour de la direction de spécularité. Pour $r = 1$, le maximum du coefficient de luminance est du même ordre de grandeur que celui des réflexions simples. En revanche, pour $r = 0,5$, il apparaît 3 fois moins important. Les réflexions d'ordre supérieur n'ont alors une contribution significative que pour $r = 1$. Elles ont un comportement semblable aux réflexions doubles avec un lobe plus fin et une amplitude plus petite.

Les observations précédentes sont confirmées par les valeurs du facteur de réflexion ρ (§ 1.2.2.2) décomposé suivant l'ordre de réflexion des rayons. Le tableau 4.1 montre que, pour une incidence normale, l'énergie transportée par les réflexions doubles n'est significative que dans le cas de la forte rugosité ($r = 1$).

	ρ_{total}	$\rho_{1 \text{ refl.}}$	$\rho_{2 \text{ refl.}}$	$\rho_{3 \text{ refl.}}$
$r = 1$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	71%	24%	5%
$r = 0,5$	$26,7 \cdot 10^{-3}$	90%	10%	0%

Tableau 4.1 : Rapports entre les facteurs de réflexion suivant l'ordre de réflexion.

Pour les incidences plus grandes, $\theta_i = 40^\circ$ et $\theta_i = 60^\circ$, les réflexions d'ordre supérieur sont toujours négligeables et pour la clarté des dessins elles ne sont pas représentées. Les deux surfaces ont des comportements opposés, car la surface la plus rugueuse ($r = 1$) présente une rétrodiffusion très marquée, alors que la surface de rugosité $r = 0,5$ a plutôt un comportement du type spéculaire. Dans les deux cas, les coefficients de luminance des réflexions doubles ont des amplitudes beaucoup moins élevées que ceux des réflexions simples. En outre, plus l'incidence est rasante plus la contribution des réflexions doubles au coefficient de luminance total de la surface est faible.

En conclusion, les figures 4.1 à 4.4 mettent en avant deux caractéristiques des réflexions multiples qui sont fonction de la rugosité des surfaces :

- Pour les rugosités inférieures ou égales à 0,5 et pour tous les angles d'éclairage, les réflexions multiples ont une contribution très faible au coefficient de luminance total de la surface et elles peuvent donc être négligées. Par ailleurs, cette contribution diminue avec la rugosité de la surface.
- Pour les surfaces très rugueuses (r supérieure ou égale à 1), les réflexions doubles sont d'un point de vue énergétique très importantes pour les incidences proches de la normale. Puis, la contribution des réflexions multiples diminue avec l'angle d'éclairage.

Contrairement aux hypothèses des modèles théoriques, les réflexions doubles et d'ordre supérieur n'ont pas un comportement lambertien. Pour les surfaces les plus «lisses», l'indicatrice de diffusion a la forme d'un lobe orienté dans la direction de spécularité. Inversement, pour la surface très rugueuse, ces réflexions ont un comportement rétrodiffusant très marqué.

4.1.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant

La démarche suivie dans cette étude est identique à celle du paragraphe précédent. Tout d'abord, les variations des proportions des réflexions simples sont tracées sur la figure 4.5. Ces courbes révèlent, qu'à l'exception des surfaces les plus rugueuses ($r = 1$ et $r = 0,5$), le nombre de réflexions simples est indépendant de l'angle d'éclairage θ_i . Par contre, il dépend de la rugosité de la surface et plus la surface est «lisse» (r est petit) plus les réflexions simples sont nombreuses. Mais, quelle que soit la rugosité de la surface, la présence de réflexions multiples est toujours constatée.

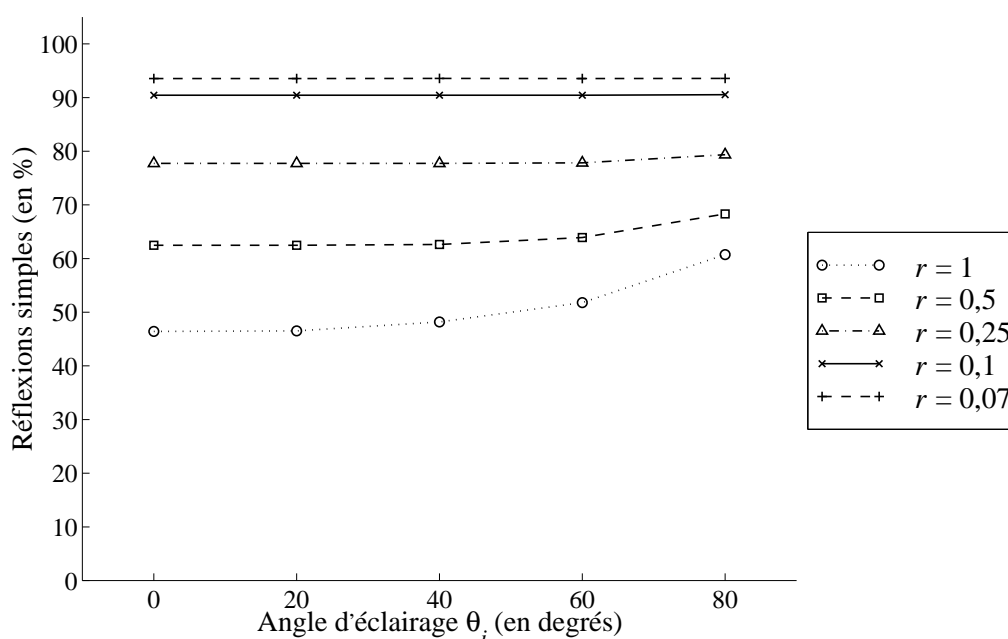


Figure 4.5 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).

La figure 4.6 donne les pourcentages respectifs des réflexions doubles et des réflexions d'ordre supérieur. Là encore, les proportions des réflexions multiples sont indépendantes de l'angle d'éclairage θ_i . Pour les surfaces de faible rugosité (r inférieur ou égal à 0,25), les courbes des réflexions doubles sont approximativement le complément à 100 des courbes des réflexions simples. Pour les rugosités plus fortes, les réflexions d'ordre supérieur restent importantes, même pour les angles d'éclairage les plus rasants. En outre, une évolution de ces pourcentages avec l'angle θ_i est constatée pour les réflexions d'ordre supérieur.

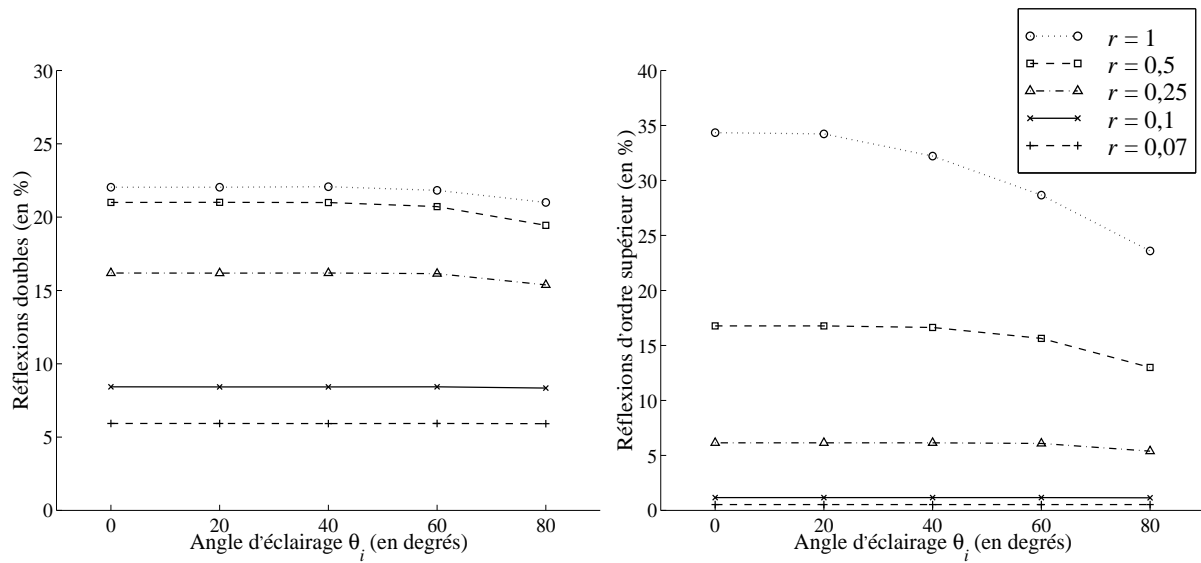


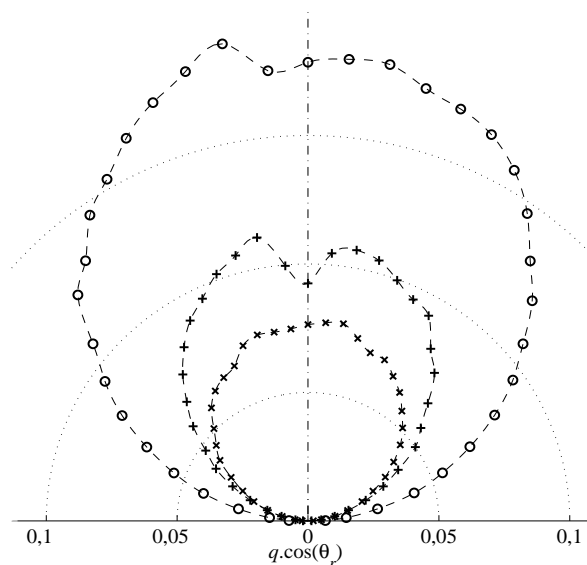
Figure 4.6 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction de la rugosité r et de l'angle d'éclairage θ_i .

Pour la surface de forte rugosité ($r = 1$), la moitié des rayons subissent une réflexion simple, 20% une réflexion double et 30% une réflexion d'ordre supérieur. Les réflexions multiples sont donc très importantes et leurs contributions au coefficient de luminance sont représentées avec les courbes de la figure 4.7.

Les réflexions simples sont à l'origine du comportement rétrodiffusant de la surface, comportement qui s'accroît pour les angles d'éclairage θ_i rasants. Mais, pour chaque angle θ_i étudié, il apparaît également que les coefficients de luminance des réflexions doubles et d'ordre supérieur ne peuvent pas être négligés. En effet, même si leurs contributions énergétiques diminuent pour les angles rasants, leurs répartitions spatiales restent très différentes de celle des réflexions simples et elles donnent des contributions importantes dans le plan de spécularité (c'est-à-dire pour $\phi_r = 180^\circ$).

Les réflexions doubles se caractérisent par une composante diffuse qui est orientée dans la direction de spécularité, alors que les réflexions d'ordre supérieur gardent toujours un comportement diffusant. Il faut également remarquer que ces réflexions ont toujours des contributions du même ordre de grandeur.

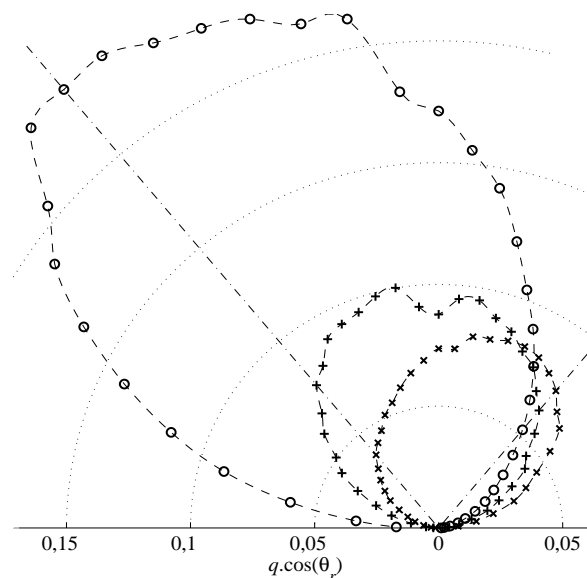
$$\theta_i = 0^\circ$$



Types de réflexions :

- o simples
- × doubles
- + d'ordre supérieur

$$\theta_i = 40^\circ$$



$$\theta_i = 60^\circ$$

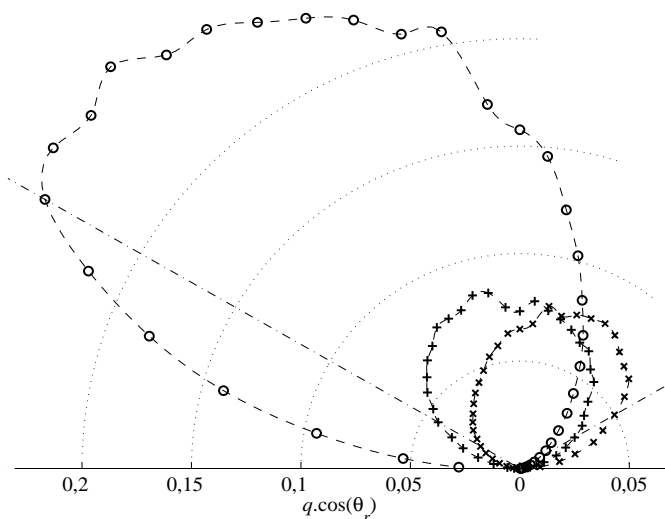


Figure 4.7 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau parfaitement diffusant et pour $r = 1$.

Lorsque la rugosité de la surface diminue, la contribution des réflexions multiples au coefficient de luminance est de moins en moins significative. Sous une incidence normale ($\theta_i = 0^\circ$), c'est-à-dire dans les conditions les plus favorables aux réflexions multiples, le coefficient de luminance dû aux réflexions simples est prépondérant (fig. 4.8). Les différences entre les réflexions doubles et les réflexions d'ordre supérieur sont aussi plus marquées que précédemment puisque ces dernières deviennent très vite négligeables en nombre et en énergie transportée.

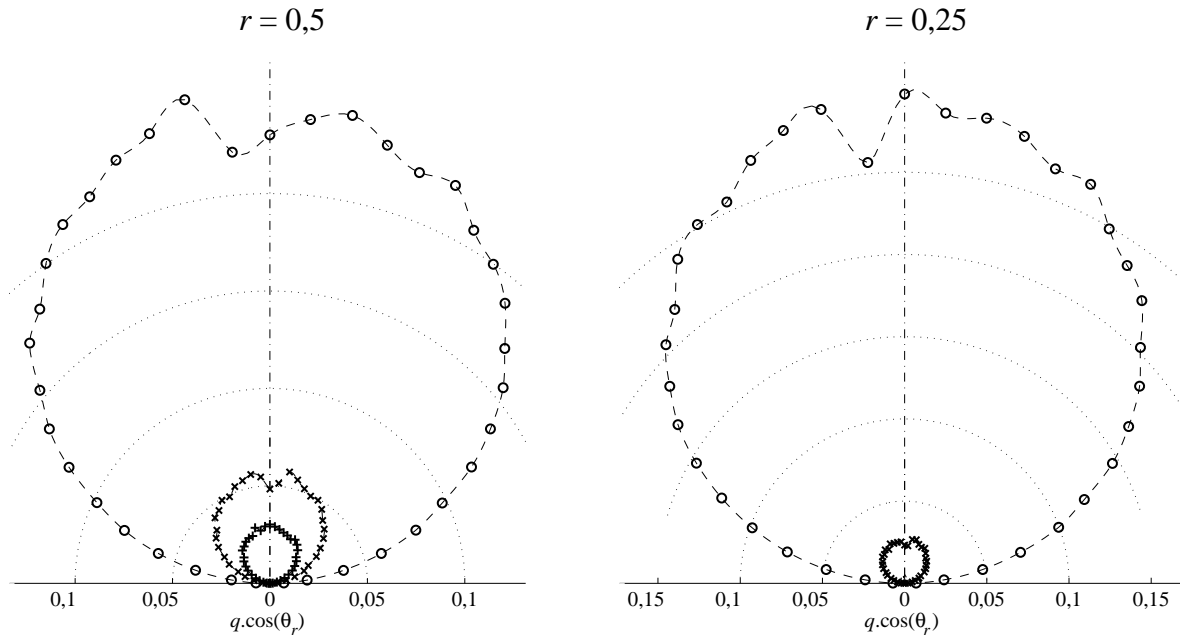


Figure 4.8 Décomposition du coefficient de luminance en fonction du nombre de réflexions, pour un matériau parfaitement diffusant et $\theta_i = 0^\circ$.

À nouveau, l'ensemble de ces observations sur les indicatrices de diffusion est confirmée par les valeurs du facteur de réflexion décomposé suivant le nombre de réflexions. Le tableau 4.2 indique clairement que toutes les réflexions multiples doivent être prises en considération pour la rugosité $r = 1$. Puis, pour les surfaces apparaissant de plus en plus «lisse», elles peuvent être négligées.

	ρ_{total}	$\rho_{1 \text{ réfl.}}$	$\rho_{2 \text{ réfl.}}$	$\rho_{3 \text{ réfl.}}$
$r = 1$	1	52%	21%	27%
$r = 0,5$	1	75%	17%	8%
$r = 0,25$	1	91%	8%	1%

Tableau 4.2 : Rapports entre les facteurs de réflexion suivant l'ordre de réflexion.

Remarque :

Le modèle utilisé dans cette étude est un modèle parfaitement diffusant en réflexion, c'est-à-dire avec un coefficient de réflexion ρ égal à 1. L'énergie transportée par un rayon est donc proportionnelle à ρ^n , où n est le nombre de réflexions du rayon sur la surface.

Si le matériau de surface absorbe une partie de l'énergie incidente, ρ est inférieur à 1 et les coefficients de luminance des réflexions simples, doubles et triples doivent être respectivement multipliés par un facteur ρ , ρ^2 et ρ^3 . Les observations précédentes sur l'importance en énergie des réflexions multiples sont donc modifiées. Une idée des variations des amplitudes auxquelles il faut s'attendre est donnée dans le tableau 4.3.

ρ	ρ^2	ρ^3	Écarts relatifs entre ρ et	
			ρ^2	ρ^3
1,0	1,00	1,00	0%	0%
0,9	0,81	0,73	10%	19%
0,8	0,64	0,51	20%	36%
0,7	0,49	0,34	30%	51%
0,6	0,36	0,22	40%	64%

Tableau 4.3 : Variations en fonction de ρ des écarts relatifs entre ρ , ρ^2 et ρ^3 .

Les écarts relatifs entre d'une part, ρ et ρ^2 et d'autre part, ρ et ρ^3 augmentent rapidement avec la diminution de ρ . Autrement dit, plus le matériau de la surface est absorbant, plus les contributions des réflexions multiples au coefficient de luminance total de la surface deviennent faibles.

Cette remarque peut être étendue à tous les matériaux qui absorbent une partie de l'énergie incidente. En effet, le raisonnement précédent reste toujours valable, la seule différence provient de la forme de l'indicatrice de diffusion du matériau.

4.2 Étude des effets de «masquage / ombrage»

Le goniophotomètre peut aussi être utilisé pour déterminer expérimentalement le coefficient de «masquage / ombrage» C d'un échantillon (§2.3.4), et *a fortiori* son coefficient de masquage S . Le calcul numérique de ces deux coefficients se fait en prenant en compte uniquement les rayons ayant subi une seule réflexion sur la surface.

L'algorithme utilisé pour le calcul du coefficient C est décrit dans un premier paragraphe (§4.2.1). Puis, il est partiellement validé en calculant le coefficient de masquage S de profils géométriques simples ou de profils gaussiens (§4.2.2.1). Pour le coefficient de «masquage / ombrage» C , un seul profil est utilisé pour la validation.

Dans une seconde partie (§4.2.3), le coefficient de «masquage / ombrage» C est déterminé pour des «surfaces à profil gaussien». Ces simulations donnent des résultats nouveaux, qui permettent de vérifier l'exactitude des modèles proposés pour décrire ce phénomène.

4.2.1 Méthode de calcul

Pour calculer le coefficient de «masquage / ombrage» C , il faut être capable de classer les facettes de la surface en deux catégories :

- les facettes éclairées sous l'angle d'incidence θ_i et vues par un observateur se trouvant dans la direction (θ_r, ϕ_r) ,
- les facettes restées dans l'ombre (phénomène d'ombrage) ou cachées à l'observateur (phénomène de masquage).

Dans ces conditions, si $n(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ est le nombre de facettes éclairées et vues pour un angle d'éclairage θ_i et la direction d'observation (θ_r, ϕ_r) , et N le nombre total de facettes de la surface, alors le coefficient C est donné par :

$$C(\theta_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{n(\theta_i; \theta_r, \phi_r)}{N} \quad (4-1)$$

Pour distinguer les facettes éclairées et vues, un tableau T_c à deux dimensions est créé. Sa taille est identique à celle du profil de la surface et à chaque facette correspond un élément unique de T_c . Si pour le calcul de C plusieurs directions d'éclairage et d'observation sont définies, autant de tableaux T_c qu'il y a de combinaisons d'une direction d'éclairage et d'une direction d'observation devront être créés. Avant le début du calcul de C , tous les éléments des tableaux T_c sont initialisés à 0.

Le principe du calcul du coefficient C est de regarder pour chaque facette de la surface si elle est «éclairée et vue». Si ces deux conditions sont réalisées, alors l'élément de T_c correspondant à la facette testée est incrémenté de 1. Tous ces tests devront être effectués pour toutes les combinaisons d'une direction d'éclairage et d'observation.

Pour réaliser ces tests, la technique du «tracé de rayon» est à nouveau utilisée. Depuis le centre de la facette testée, un rayon est lancé dans la direction de la source. Si ce rayon ne rencontre pas la surface, c'est que la facette est éclairée. Dans ce cas, un nouveau rayon est lancé du centre de la facette vers l'observateur. Encore une fois, s'il n'y a pas d'interception avec la surface, c'est que la facette est vue. Ces opérations sont effectuées un grand nombre de fois et la méthode a donc été optimisée. Les directions d'incidence et d'observation sont testées dans l'ordre décroissant des angles θ_i et θ_r , c'est-à-dire des incidences rasantes vers les incidences normales. En effet, si pour une direction d'incidence θ_i donnée la facette est éclairée, alors elle le sera toujours pour les incidences inférieures. Ce raisonnement est également valable pour les directions d'observation (pour un angle ϕ_r fixé). Ainsi, le nombre de tests diminue de manière plus ou moins importante en fonction des valeurs θ_i et θ_r qui fixent la limite entre le cas où la facette est «éclairée et vue» et les autres cas, la valeur de ces angles étant elle-même dépendante de la rugosité de la surface.

Après avoir testé toutes les facettes de la surface, les éléments de T_c contiendront deux valeurs :

- soit 1, la facette est «éclairée et vue»,
- soit 0, la facette se trouve dans l'ombre ou est masquée.

L'algorithme calculant le coefficient de «masquage / ombrage» C s'écrit donc symboliquement sous la forme suivante :

```
Charger le profil de la surface

Pour chaque facette de la surface faire

    calculer les coordonnées (x, y, z) du centre de la facette

    pour chaque direction d'éclairage faire

        si (le centre de la facette est éclairé par la source)

            pour chaque direction d'observation faire

                si (le centre de la facette est vu par l'observateur)
                    incrémenter l'élément de T correspondant à la facette

            fin faire

        fin faire

    fin faire

fin faire
```

Le nombre $n(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ de facettes éclairées et vues est obtenu en comptabilisant le nombre d'éléments à 1 du tableau T_c correspondant aux directions θ_i et (θ_r, ϕ_r) . La valeur du coefficient C est alors donnée par l'équation (4-1).

Dans la méthode de calcul retenue, une source d'imprécision sur la valeur du coefficient C peut provenir de la taille des facettes. En effet, la visibilité d'une facette depuis la source et depuis l'observateur est calculée par rapport au centre de la facette. Mais, cette facette peut être partiellement masquée ou éclairée. Dans les deux cas, elle sera comptabilisée,

ce qui signifie que toute sa surface sera prise en compte : le coefficient C est alors surestimé. Cependant, quand le centre de la facette est masqué ou ombré, l'effet inverse peut également se produire, ce qui aboutit alors à une sous-estimation de C . Du fait que la surface est composée d'un grand nombre de facettes, ces deux phénomènes ont tendance à s'annuler. Cette hypothèse a été confirmée en calculant le coefficient C de deux surfaces de même profil, l'une étant suréchantillonnée par rapport à l'autre. Les écarts observés entre ces deux simulations sont toujours négligeables.

4.2.2 Validation de la méthode

La méthode proposée pour calculer le coefficient de «masquage / ombrage» C est difficile à valider, car il n'existe pas de modèles théoriques fiables pour toutes les directions d'observation ϕ_r (§2.3.4). Cependant, le coefficient de masquage S d'une surface est un cas particulier du coefficient C :

- Pour un éclairage normal ($\theta_i = 0^\circ$) et une direction d'observation ϕ_r fixée, θ_r étant quelconque, c'est $S(\theta_r)$ qui est calculé.
- Pour une observation normale ($\theta_r = 0^\circ$, ϕ_r étant quelconque) et un angle d'incidence θ_i variable, c'est $S(\theta_i)$ qui est alors obtenu.

Dans un premier temps, c'est le calcul du coefficient S pour différents profils de surface qui permettra de valider l'algorithme. Ensuite, le calcul du coefficient C pour des directions d'observation quelconques sera validé pour un profil très simple.

4.2.2.1 Calcul du coefficient de masquage S

Pour tester l'algorithme de calcul du coefficient de masquage $S(\theta)$, deux surfaces simples sont tout d'abord utilisées : l'une avec un profil en triangle, l'autre avec un profil sinusoïdal. Pour ces deux surfaces, leur coefficient de masquage est donné par un raisonnement mathématique simple qui permet d'avoir une formulation analytique de S . En outre, le coefficient de masquage de ces surfaces présente un angle de coupure qui dépend des paramètres définissant le profil. Il est intéressant de vérifier que la méthode numérique développée permet de reproduire cette caractéristique remarquable de S .

Par la suite, le coefficient de masquage S est calculé pour des surfaces à profil gaussien. Les résultats obtenus sont comparés d'une part, aux valeurs de Brockelman et Hagfors [BRO 66] et d'autre part, au modèle de Smith [SMI 67].

a. Surface à profil en triangle

Le profil en triangle est caractérisé, soit par l'angle ϕ des pentes des triangles, soit par le pas d de ces triangles et leur hauteur h . Ces trois paramètres sont reliés par la relation $\tan(\phi) = h/d$. La figure 4.9 montre que pour un angle d'incidence θ inférieur à $\pi/2 - \phi$, toute la surface est éclairée. Quand l'angle θ est égal à $\pi/2 - \phi$, la moitié de la surface passe dans l'ombre, et pour des valeurs plus grandes de θ , l'ombre augmente progressivement.

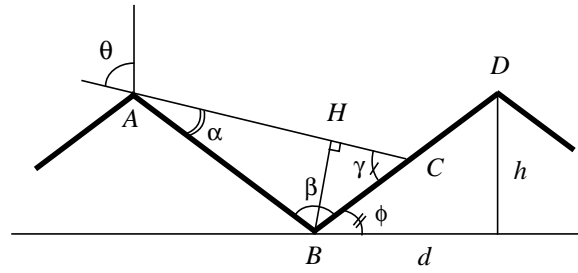


Figure 4.9 Représentation des différents angles nécessaires pour le calcul de la longueur BC .

Pour déterminer l'aire de la surface passée dans l'ombre, il faut calculer la longueur du segment BC , qui représente la longueur de l'ombre projetée par le sommet A le long du segment BD . Dans le triangle ABC , trois angles α , β , γ sont définis. Ces angles sont reliés aux angles θ et ϕ par les relations suivantes :

$$\alpha = \theta + \phi - \pi/2$$

$$\beta = \pi - 2\phi$$

$$\gamma = \phi - \theta + \pi/2$$

Si H est la projection orthogonale de B sur AC , alors $BH = AB \sin(\alpha) = BC \sin(\gamma)$. La longueur BC est déduite de ces égalités et :

$$BC = AB \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

En remplaçant α et γ par leurs valeurs, l'expression de BC ne dépend plus que des angles ϕ et θ :

$$BC = AB \frac{\cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

La proportion de surface masquée est donnée par le rapport des longueurs $AB + BC$ sur $AB + BD$. Les longueurs AB et BD étant égales, le coefficient de masquage S est donc :

$$\begin{aligned} S(\theta) &= 1 && \text{pour } \theta < \frac{\pi}{2} - \phi \\ S(\theta) &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)} \right) && \text{pour } \frac{\pi}{2} - \phi \leq \theta < \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4-2)$$

Pour $\phi + \theta = \pi/2$, la longueur du segment BC est nulle, car dans ce cas, seulement AB se trouve dans l'ombre. Dans ce cas, exactement la moitié de la surface est éclairée et le coefficient de masquage vaut $1/2$: $S(\pi/2 - \phi) = 1/2$.

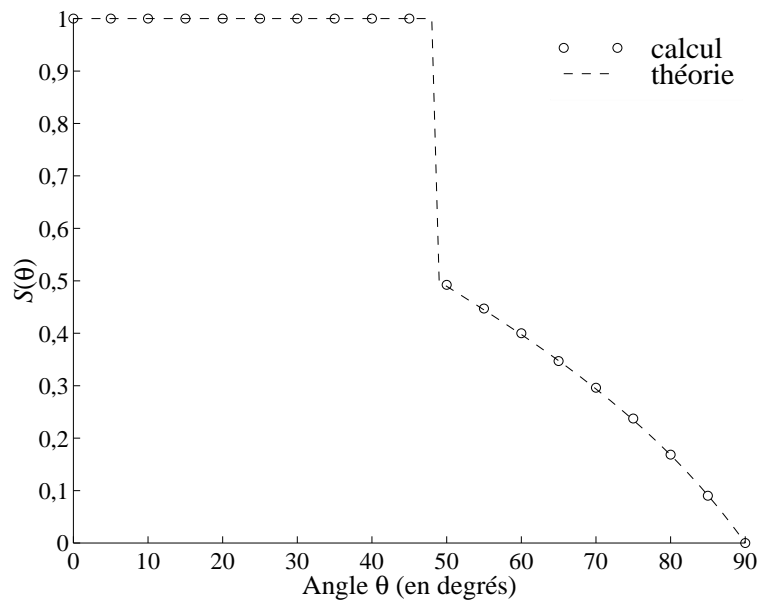


Figure 4.10 Coefficient de masquage $S(\theta)$ d'un profil en triangle.

Le profil testé a pour paramètres $h = 28$ et $d = 32$ (les unités sont arbitraires) ce qui donne pour l'angle de coupure θ_c une valeur de $48,8^\circ$. Sur la figure 4.10, cette valeur de l'angle de coupure correspond au décrochement vertical. Les résultats obtenus en utilisant le goniophotomètre virtuel concordent parfaitement avec les prévisions de l'équation (4-2).

b. Surface à profil sinusoïdal

L'équation du profil sinusoïdal est de la forme $f(x) = a \cdot \sin(bx)$. Comme pour le profil en triangle, il faut déterminer la longueur de l'ombre le long du profil de la surface.

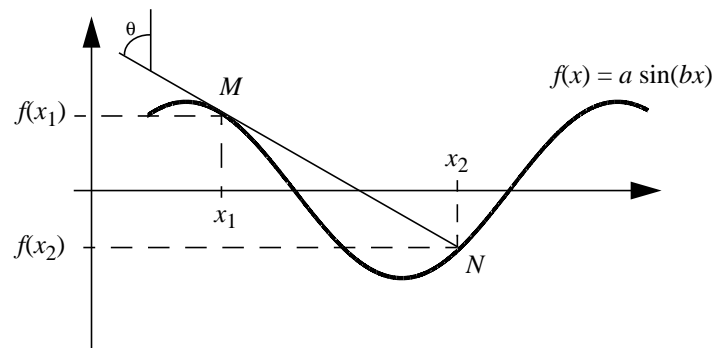


Figure 4.11 Définition des points d'entrée M et de sortie N de l'ombre pour un profil sinusoïdal.

D'après la figure 4.11, l'abscisse $x_1(\theta)$ du point d'entrée dans l'ombre M est obtenue en remarquant que la pente de la tangente à la surface est égale à celle du rayon incident, soit $1/\tan(\theta)$. Ceci donne comme relation :

$$-\left.\frac{df}{dx}\right|_{x=x_1} = ab \cos(bx_1(\theta)) = \frac{1}{\tan(\theta)}$$

et la valeur de $x_1(\theta)$ est donc :

$$x_1(\theta) = \frac{1}{b} \arccos\left(\frac{1}{ab \tan(\theta)}\right)$$

L'abscisse $x_2(\theta)$ du point de sortie de l'ombre N est obtenu en exprimant $\tan(\theta)$ en fonction des coordonnées des points M et N et elle vérifie l'équation :

$$\tan(\theta) = \frac{x_1(\theta) - x_2(\theta)}{f(x_2) - f(x_1)}$$

ou encore :

$$a \cdot \sin(bx_1(\theta)) + \frac{x_1(\theta)}{\tan(\theta)} = a \cdot \sin(bx_2(\theta)) + \frac{x_2(\theta)}{\tan(\theta)}$$

Cette équation n'a pas de solution analytique pour $x_2(\theta)$. Cependant, une solution numérique peut être déterminée pour un angle d'incidence θ donné.

Finalement, le coefficient de masquage S s'exprime en fonction des abscisses $x_1(\theta)$ et $x_2(\theta)$ et a pour expression :

$$S(\theta) = 1 - \frac{x_2(\theta) - x_1(\theta)}{2\pi/b} \quad (4-3)$$

Pour les tests, un profil sinusoïdal de période $P = 63,75$ et de hauteur $h = 15$ a été créé (les unités sont arbitraires). La surface correspondante est échantillonnée avec un pas de 0,25 et 256 points. Les paramètres a et b de la fonction $f(x)$ définie plus haut valent alors : $a = 15$, $b = 2\pi/P = 0,0986$.

Sur la figure 4.12, les résultats du calcul du coefficient de masquage S sont comparés aux prédictions données par l'équation (4-3). Encore une fois, la concordance entre les prévisions et les résultats expérimentaux est très bonne.

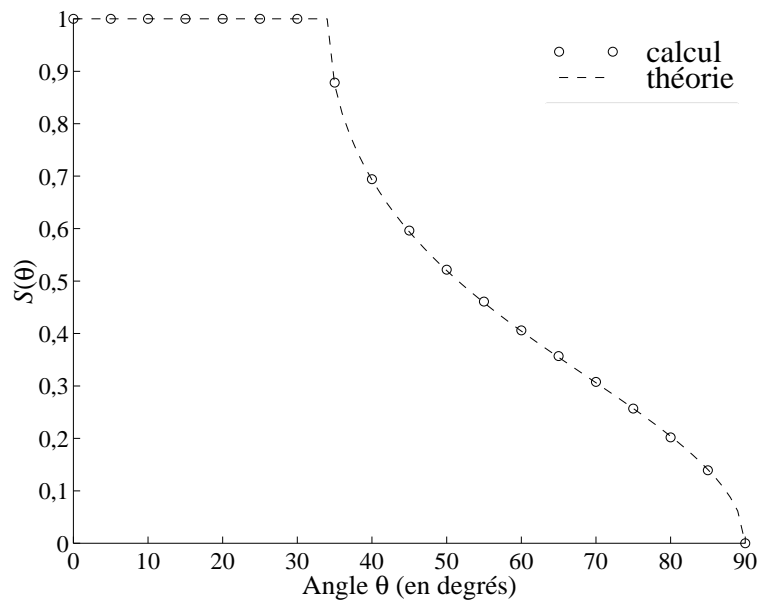


Figure 4.12 Coefficient de masquage $S(\theta)$ d'un profil sinusoïdal.

c. Surfaces à profil gaussien

Pour permettre des comparaisons avec les données de Brockelman et Hagfors [BRO 66], les surfaces utilisées ont des rugosités r égales à $r = \{1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,1\}$. Pour chacune des quatre rugosités, 10 surfaces sont générées et leur coefficient de masquage S est calculé. Les caractéristiques physiques de ces surfaces sont récapitulées dans le tableau 4.4.

r	σ (en mm)	T (en mm)	Pas d'échantillonnage (en mm x mm)	Nombre de pas
1	1	1	0,0472 x 0,0472	512 x 512
0,5	1	2	0,0945 x 0,0945	512 x 512
0,25	1	4	0,1890 x 0,1890	512 x 512
0,1	1	10	0,4725 x 0,4725	512 x 512

Tableau 4.4 : Caractéristiques des profils gaussiens utilisés

Les courbes de la figure 4.13 présentent les moyennes des 10 coefficients de masquage S obtenus avec le goniophotomètre virtuel. Les prévisions du modèle de Smith (§2.3.4.2 équation (2-27)), et les données de Brockelman et Hagfors sont également tracées.

Quelle que soit la rugosité r de la surface, les résultats déterminés avec le goniophotomètre virtuel sont quasiment identiques à ceux de Brockelman et Hagfors. Les écarts entre ces deux simulations sont peu significatifs, même dans les cas les moins favorables, c'est-à-dire pour les angles rasants et les grandes rugosités. La conséquence de ces observations est que les valeurs de S données par le goniophotomètre virtuel présentent dans l'ensemble des différences négligeables, inférieures à 3%, avec le modèle théorique de Smith. Toutefois, pour les surfaces les plus rugueuses ($r = 1$ et $r = 0,5$) et uniquement pour les angles θ rasants, ces écarts relatifs peuvent avoir des valeurs plus grandes, proches de 20%.

Comme cela a été dit dans le paragraphe 2.3.4.3 et vérifié une seconde fois à l'aide du goniophotomètre virtuel, le modèle de Smith reste donc très proche des données expérimentales. Cependant, les courbes théoriques de Smith ne sont pas comprises dans les barres d'erreur des moyennes de $S(\theta)$. Pour faciliter la lecture des courbes, ces barres d'erreur ne sont pas tracées car elles sont petites et confondues avec les symboles des données.

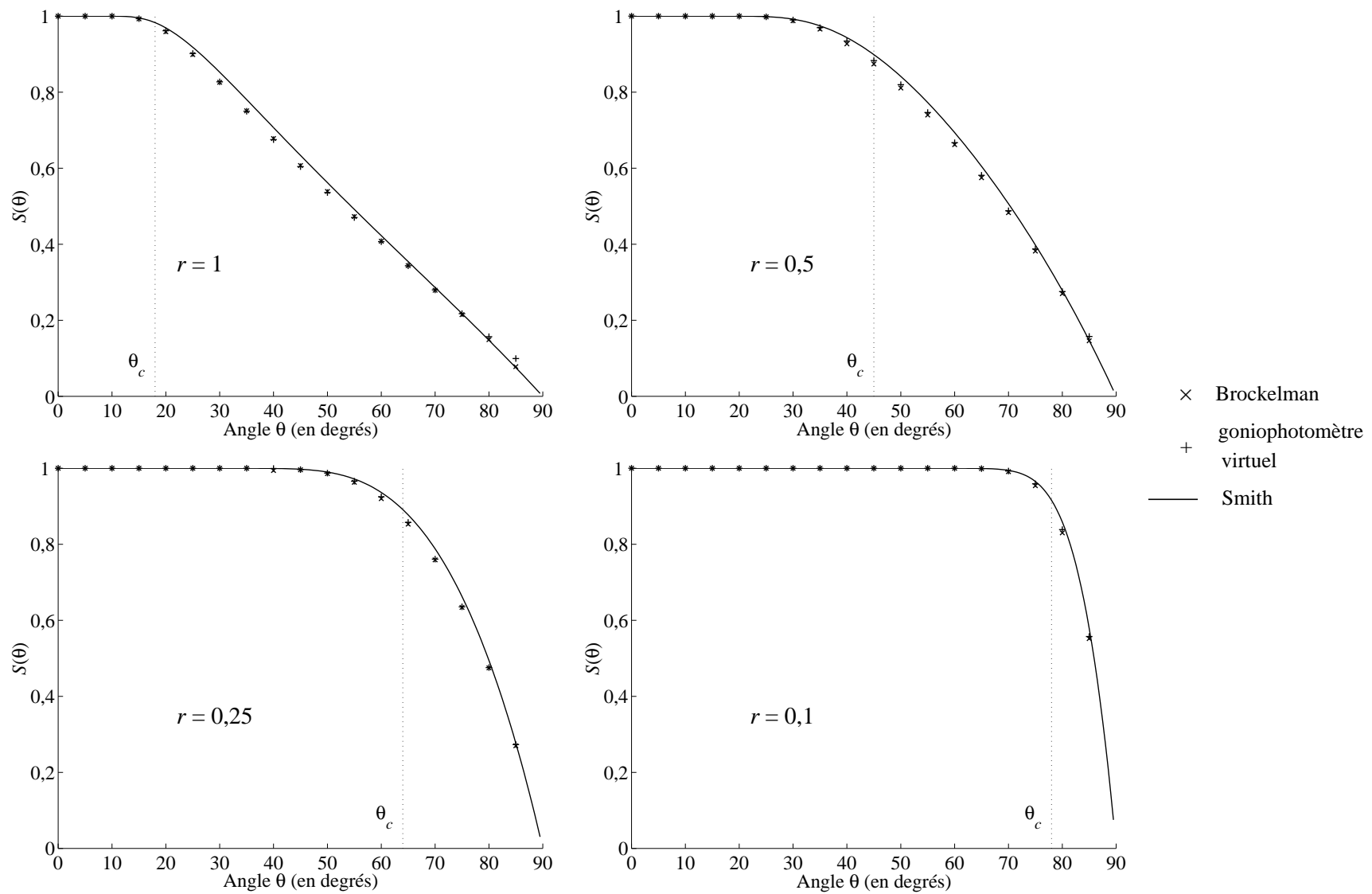


Figure 4.13 Comparaison entre les valeurs de S calculées avec le goniophotomètre virtuel, le modèle de Smith et les données de Brockelman et Hagfors.

4.2.2.2 Calcul du coefficient de «masquage / ombrage» C

Les résultats obtenus pour le coefficient de masquage S ont montré que l'algorithme fonctionne correctement pour une direction d'observation ϕ_r fixée. Dans le test suivant, trois directions d'observation sont utilisées : $\phi_r = 0^\circ$ (direction de rétrodiffusion), $\phi_r = 90^\circ$ (direction perpendiculaire au plan d'éclairage) et $\phi_r = 180^\circ$ (direction de spécularité).

La vérification de l'algorithme de calcul du coefficient de «masquage / ombrage» $C(\theta_i; \theta_r, \phi_r)$ est faite sur un profil simple. Le profil retenu, un créneau en triangle, est caractérisé par son asymétrie entre les directions Ox et Oy et par un angle de coupure, noté θ_c , égal à $48,8^\circ$ (§4.2.2.1 section a). En prenant un plan d'éclairage confondu avec le plan Oxz (fig. 4.14), la surface est entièrement éclairée pour des angles d'éclairage θ_i inférieurs à θ_c . Puis, pour $\theta_i = \theta_c$, la moitié de la surface se retrouve dans l'ombre et pour des angles d'éclairage plus rasants, la surface éclairée diminue d'une manière monotone.

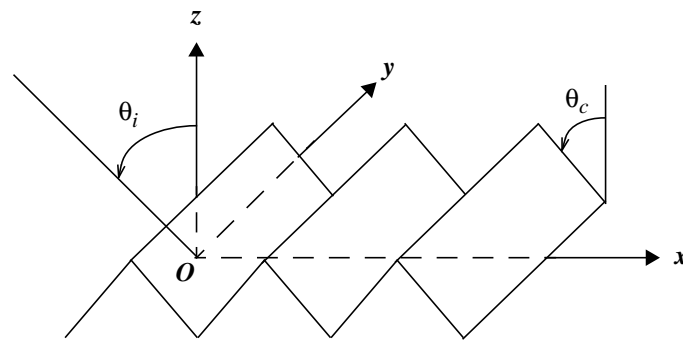


Figure 4.14 Profil en triangle utilisé.

Le coefficient de «masquage / ombrage» C de ce profil présente certaines propriétés remarquables qu'un raisonnement simple permet de prédire. Ces propriétés dépendent de l'angle θ_c et de la direction d'observation définie par ϕ_r (fig. 4.16).

Dans le plan d'éclairage et pour la direction de spécularité $\phi_r = 180^\circ$, les directions d'incidence θ_i et d'observation θ_r sont symétriques par rapport à l'axe Oz . Les remarques précédentes s'appliquent pour la partie de la surface éclairée et pour la partie de surface vue. Les résultats attendus sont donc les suivants :

- Si θ_i et θ_r sont inférieurs à θ_c , toute la surface est éclairée et vue, donc $C(\theta_i; \theta_r, 180^\circ) = 1$.
- Si θ_i et θ_r sont supérieurs à θ_c , la partie éclairée de la surface ne peut pas être vue, donc $C(\theta_i; \theta_r, 180^\circ) = 0$.
- Dans tous les autres cas, $C(\theta_i; \theta_r, 180^\circ)$ est plus petit que 0,5 et tend vers 0 pour des angles d'éclairage ou d'observation rasants.

Dans un plan orthogonal au plan d'éclairage, $\phi_r = 90^\circ$, l'angle d'observation θ_r n'a plus d'influence car toute la surface est vue. Dans ce cas, $C(\theta_i; \theta_r, 90^\circ)$ dépend uniquement de l'angle d'éclairage θ_i et est égal au coefficient de masquage $S(\theta_i)$ de la surface.

Enfin, pour la direction de rétrodiffusion $\phi_r = 0^\circ$, les résultats observés pour $\phi_r = 180^\circ$ sont légèrement modifiés. Pour θ_i et θ_r inférieurs à θ_c , la surface est entièrement éclairée et vue, donc $C(\theta_i; \theta_r, 0^\circ) = 1$. Dans le cas où $\theta_i \geq \theta_c$, seulement une partie de la surface est éclairée. Comme le montre la figure 4.15, il existe deux situations :

- Si $\theta_r \leq \theta_i$, alors toute la surface éclairée est vue et $C(\theta_i; \theta_r, 0^\circ) = S(\theta_i)$.
- Si $\theta_r \geq \theta_i$, seulement une partie de la surface éclairée est vue et $C(\theta_i; \theta_r, 0^\circ) = S(\theta_r)$.

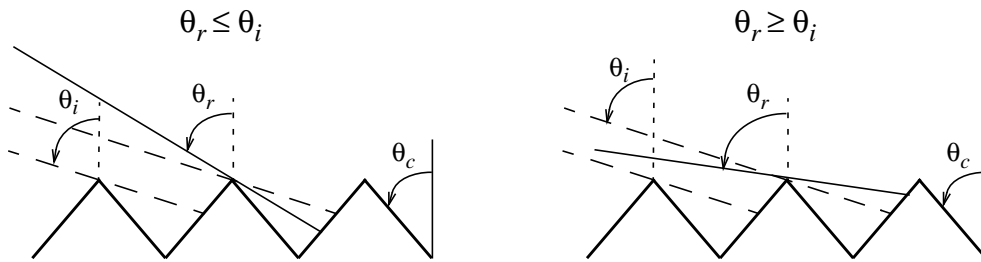


Figure 4.15 Calcul du coefficient de «masquage / ombrage» C pour $\phi_r = 0^\circ$.

Mais, comme $S(\theta_i)$ et $S(\theta_r)$ sont identiques, le coefficient C est égal au coefficient de masquage correspondant au plus grand des angles θ_i et θ_r : $C(\theta_i; \theta_r, 0^\circ) = S(\max(\theta_i, \theta_r))$. Il est donc symétrique par rapport à un plan défini par l'égalité $\theta_i = \theta_r$.

Toutes les prédictions énoncées précédemment sont retrouvées par la simulation. Les résultats obtenus avec le goniophotomètre virtuel sont présentés avec la figure 4.16 pour les trois directions d'observation ϕ_r , $\phi_r = \{0^\circ, 90^\circ, 180^\circ\}$. De plus, pour différentes combinaisons des directions d'éclairage et d'observation, il a été vérifié que ces résultats concordent également avec le modèle théorique du coefficient de masquage S donné par l'équation (4-2) et la définition de Beckmann (2-24) du coefficient de «masquage / ombrage».

Figure 4.16.a :
 $\phi_r = 180^\circ$

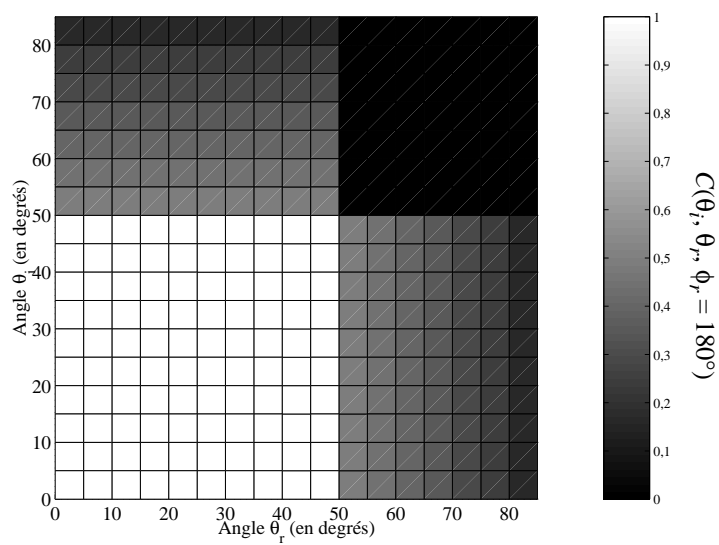


Figure 4.16.b :
 $\phi_r = 90^\circ$

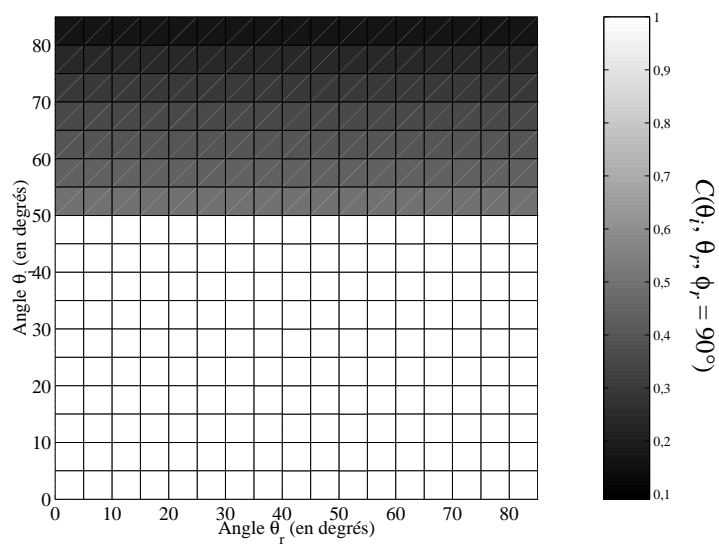


Figure 4.16.c :
 $\phi_r = 0^\circ$

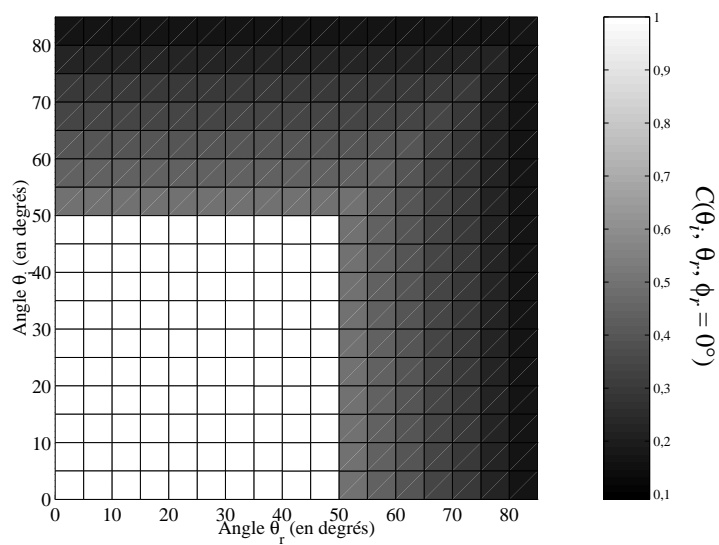


Figure 4.16 Fonction de «masquage / ombrage» $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r)$ pour un profil de surface en triangle et pour trois directions d'observation ϕ_r .

4.2.3 Étude du coefficient de «masquage / ombrage» C

Comme pour l'étude du coefficient de masquage S (§4.2.2.1 section c), pour chaque rugosité r , un total de 10 surfaces sont générées. Les résultats obtenus pour le coefficient de «masquage / ombrage» C sont donnés par la moyenne du coefficient C de chacune de ces surfaces.

4.2.3.1 Cas où les plans d'éclairage et d'observation sont confondus

Dans cette première partie, le coefficient de «masquage / ombrage» C est représenté en coupe pour les directions d'observation $\phi_r = 180^\circ$ (plan de rétrodiffusion) et $\phi_r = 0^\circ$ (plan de spécularité).

Les courbes sont éclatées en fonction de l'angle d'éclairage θ_i (figures 4.17 et 4.18). Les valeurs des angles θ_i sont choisies de telle façon que la répartition de ces courbes est régulière pour $\theta_r = 0^\circ$ (tableau 4.5). Pour les valeurs de θ_i plus petites que la valeur de l'angle de coupe θ_c (§2.3.4.3), toutes les courbes du coefficient C sont confondues. Par la suite, ces courbes vont se séparer avec l'augmentation de θ_i et les variations d'une courbe à l'autre seront de plus en plus grandes à mesure que l'angle θ_i devient rasant. D'autre part, d'une manière générale, les valeurs de C diminuent quand les valeurs de θ_i augmentent.

L'angle θ_r varie de 0° à 85° par pas de 5° . À chaque fois, les prévisions du modèle de Beckmann-Smith sont tracées en trait plein (équations (2-24) et (2-27)).

r	1	0,5	0,25	0,1
θ_c	18°	45°	64°	78°
θ_i	$10^\circ, 40^\circ,$ $60^\circ, 85^\circ$	$20^\circ, 60^\circ,$ $75^\circ, 85^\circ$	$40^\circ, 70^\circ,$ $80^\circ, 85^\circ$	$60^\circ, 80^\circ,$ 85°

Tableau 4.5 : Angles θ_i utilisés dans les figures 4.17 et 4.18.

Les écarts entre les prédictions et les résultats numériques sont très variables en fonction de la rugosité de la surface et des angles d'éclairage et d'observation. Cependant certaines constances sont observées pour toutes les surfaces :

- des écarts faibles toujours inférieurs à 5%, pour les angles θ_i inférieurs à θ_c et pour tous les angles θ_r ,
- un écart systématique de l'ordre de 5% pour les valeurs de θ_r inférieures à θ_c ,
- des écarts plus importants pour les angles θ_r rasants.

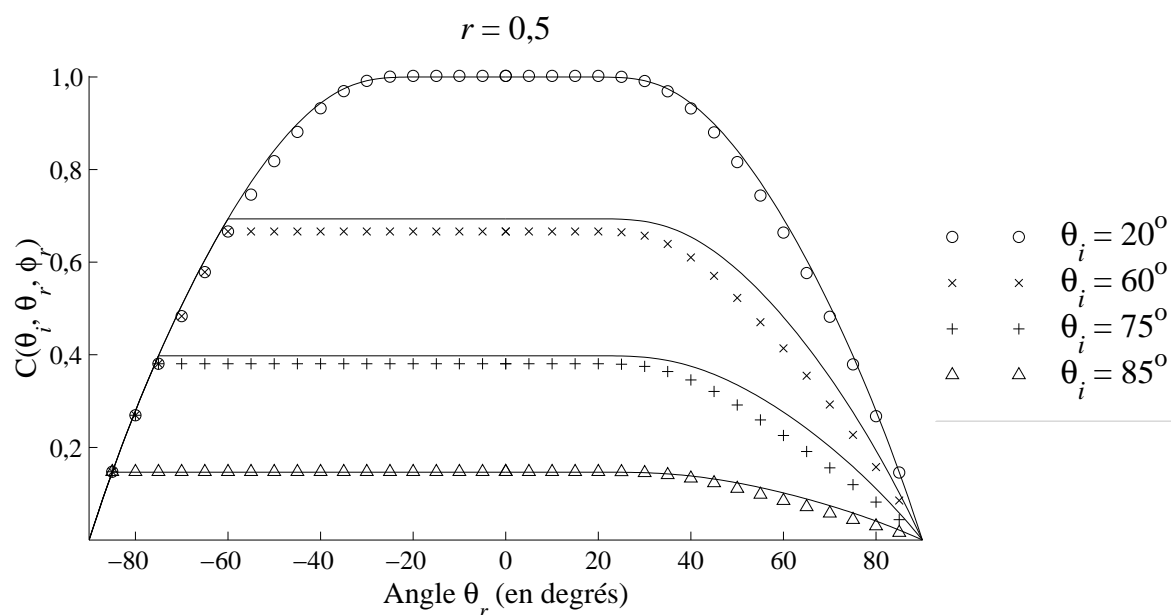
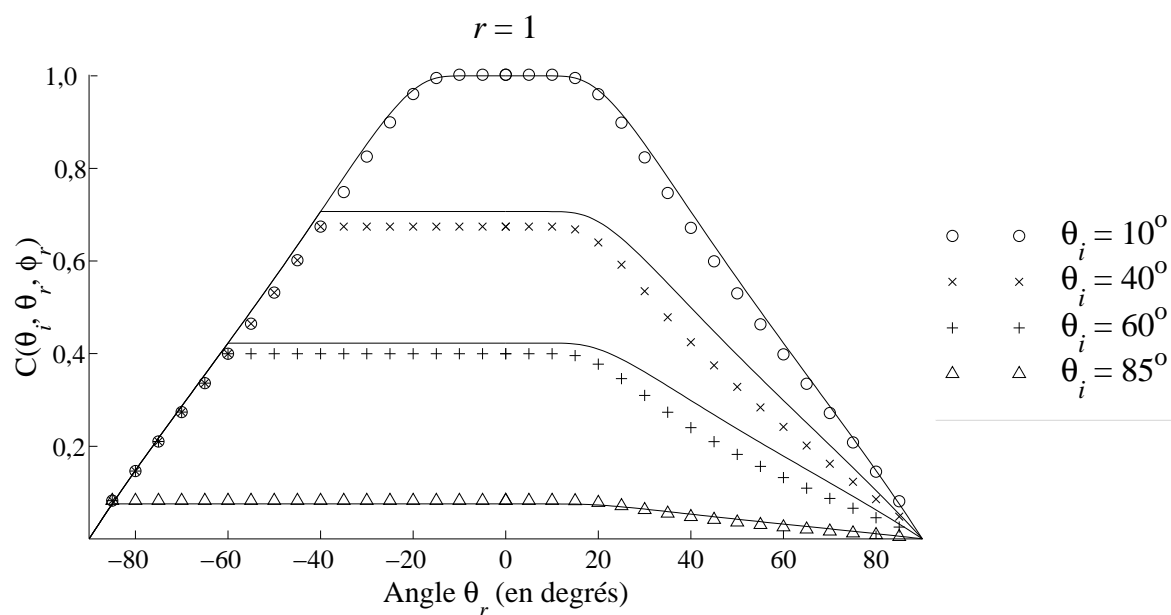


Figure 4.17 Comparaison entre les valeurs simulées de C (symboles) et le modèle de Smith (trait plein), dans le plan d'éclairage et pour une rugosité r de 1 et 0,5.

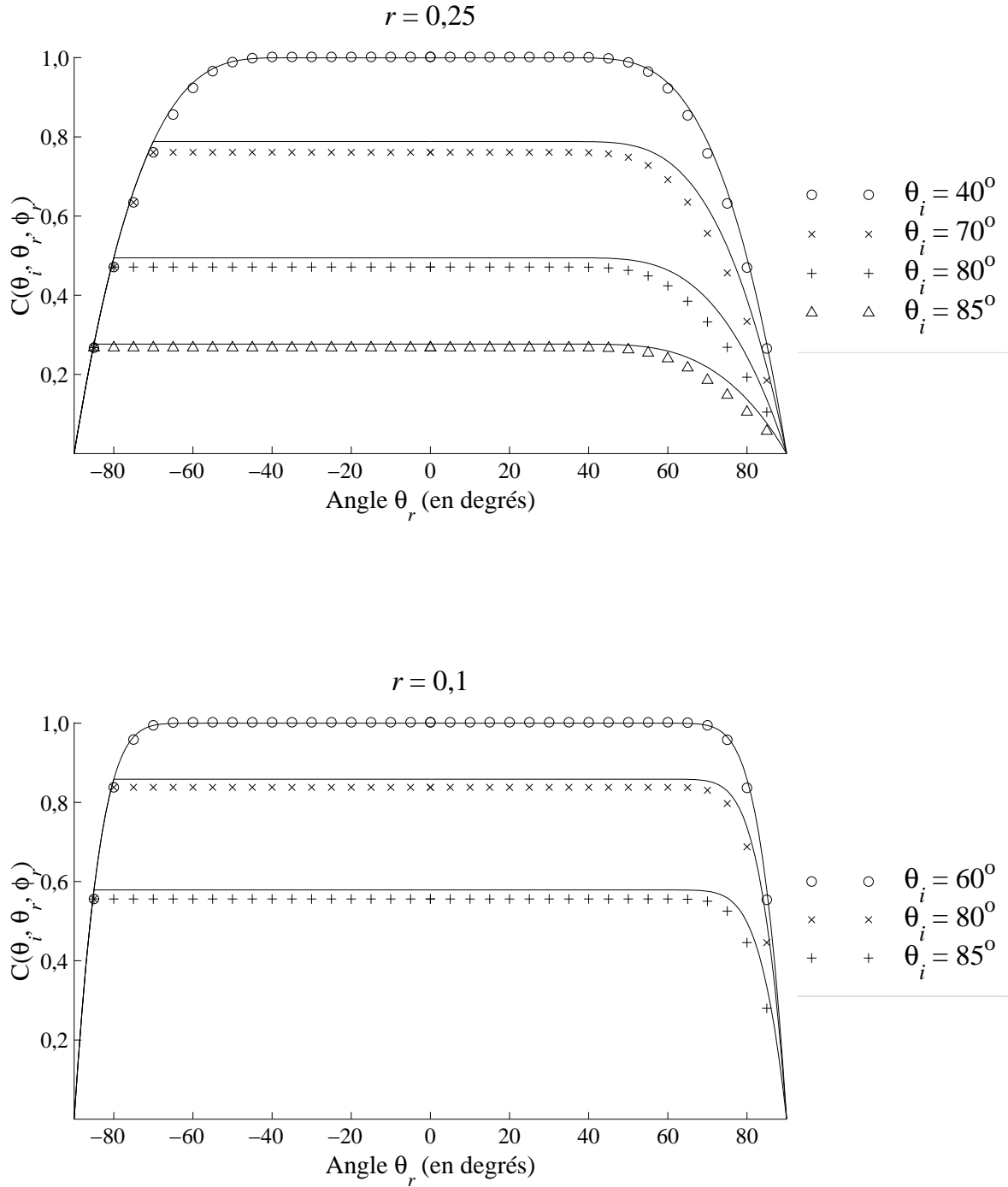


Figure 4.18 Comparaison entre les valeurs simulées de C (symboles) et le modèle de Smith (trait plein), dans le plan d'éclairage et pour une rugosité r de 0,25 et 0,1.

Dans tous les cas, les écarts augmentent avec l'angle d'éclairage θ_i , dès qu'il est plus grand que θ_c . Pour les surfaces de grande rugosité ($r = 1$ et $r = 0,5$) et pour $\phi_r = 180^\circ$, ces écarts atteignent au moins 30%. En revanche, pour $\phi_r = 0^\circ$, ils sont beaucoup moins importants et leur maximum est de l'ordre de 15%. Étant donné les écarts déjà remarqués pour le calcul du coefficient de masquage S , les résultats des figures 4.17 et 4.18 ne sont pas surprenants. En effet, le coefficient C est le résultat d'un produit de deux coefficients S . Les écarts observés au paragraphe 4.2.2.2, section c, entre les simulations et le modèle de Smith vont donc ici être à l'origine d'écarts plus grands.

4.2.3.2 Cas des autres plans d'observation

Dans cette seconde partie, les figures 4.19 et 4.20 présentent pour chaque rugosité r , le coefficient C tracé pour deux angles d'éclairage et pour cinq directions d'observation ϕ_r .

Les valeurs inférieures de θ_r , notées θ_{r0} , sont choisies pour supprimer le palier observé sur les courbes précédentes (fig. 4.17 et fig. 4.18). Elles correspondent également aux valeurs de θ_r à partir desquelles il apparaît des différences pour C en fonction des directions ϕ_r . La valeur θ_{r0} varie suivant la rugosité de la surface, et pour des angles θ_r inférieurs, le coefficient C est constant et égal à la valeur du coefficient de masquage $S(\theta_i)$:

$$C(\theta_i; \theta_r \leq \theta_{r0}, \phi_i) = S(\theta_i)$$

Les angles d'éclairage θ_i choisis donnent une idée générale des variations de C en fonction de cet angle. Pour chaque rugosité, il existe un angle d'éclairage θ_{i0} en dessous duquel, le coefficient C est identique pour toutes les directions d'observation ϕ_r :

$$C(\theta_i \leq \theta_{i0}; \theta_r, \phi_i) = S(\theta_r)$$

La valeur de θ_{i0} varie suivant la rugosité de la surface et elle est approximativement de 0° , 20° , 40° , 60° pour les rugosités 1, 0,5, 0,25 et 0,1. Plus la surface est rugueuse, plus la direction d'observation ϕ_r a des effets précoces.

r	θ_{i0}	θ_i retenus	θ_{r0}
1	0°	40° et 60°	10°
0,5	20°	40° et 60°	20°
0,25	40°	70° et 80°	40°
0,1	60°	80° et 85°	60°

Tableau 4.6 : Récapitulatif des différents angles θ_i et θ_r utilisés pour les figures 4.19 et 4.20.

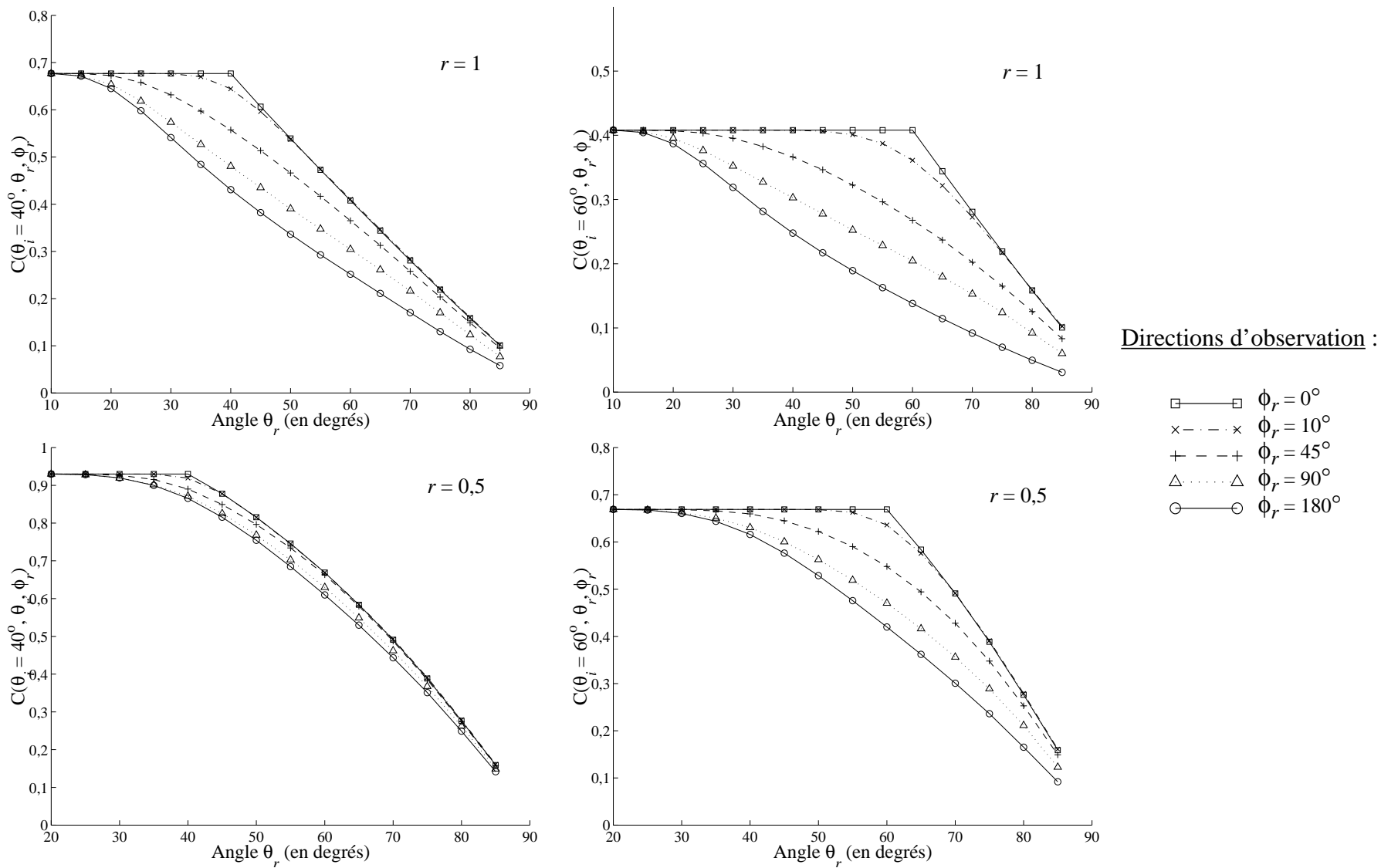


Figure 4.19 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) et de la rugosité r de la surface : $r = 1$ (en haut) et $r = 0,5$ (en bas).

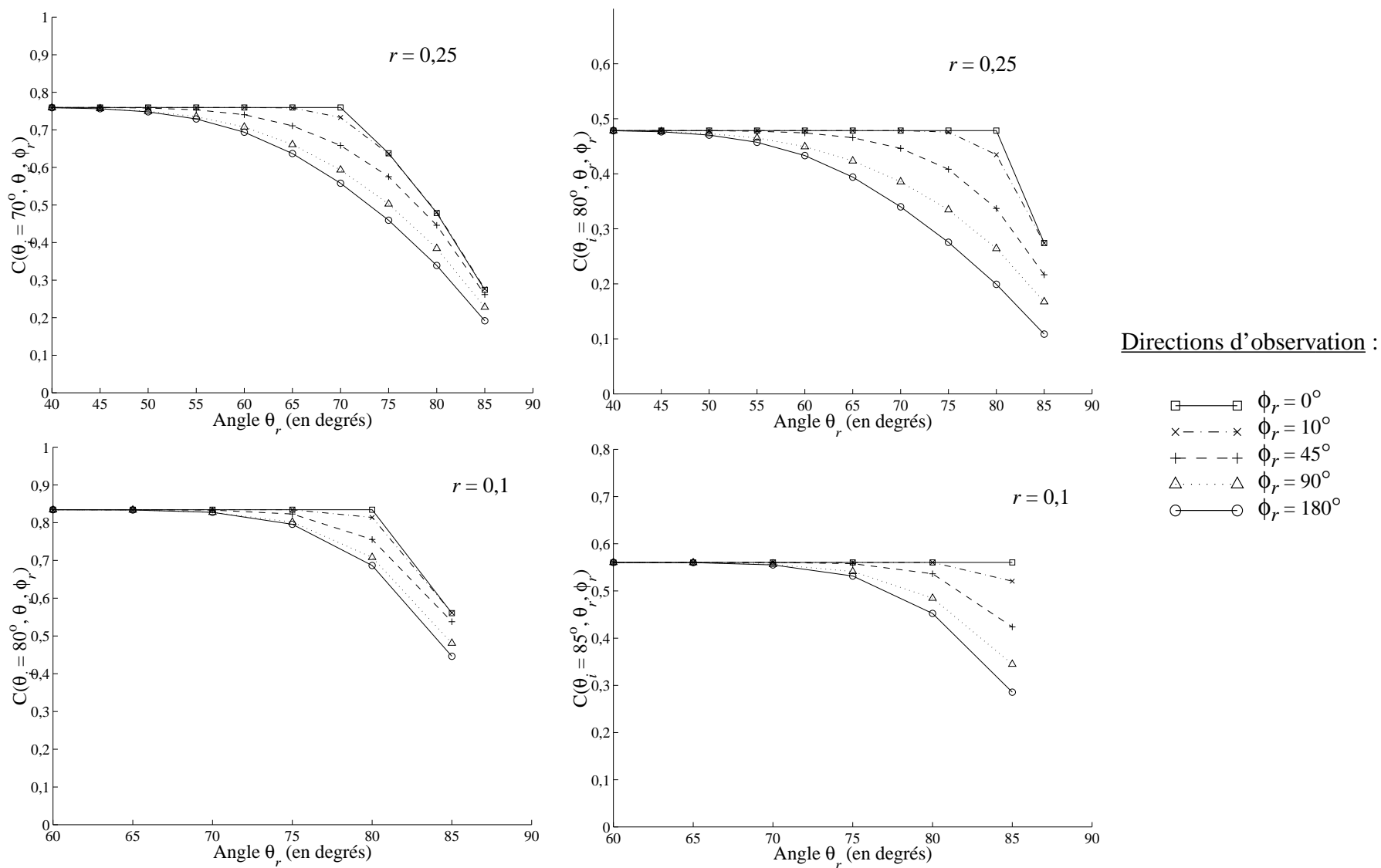


Figure 4.20 Coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) et de la rugosité r de la surface : $r = 0,25$ (en haut) et $r = 0,1$ (en bas).

En dehors de ces deux domaines particuliers, les résultats obtenus montrent une forte influence de la direction d'observation ϕ_r . Ces observations remettent en cause les modèles proposés par Beckmann-Smith ou Wagner (§ 2.3.4.1). En effet, selon eux, les directions d'observations n'influencent pas le coefficient C , sauf pour $\phi_r = 0^\circ$ (plan de rétrodiffusion). Les figures 4.19 et 4.20 démontrent le contraire. Pour des angles θ_i et θ_r fixés, le coefficient C varie progressivement, et sans doute de manière continue, entre le maximum $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r = 0^\circ)$ et le minimum $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r = 180^\circ)$. Les variations sont plus rapides pour les directions ϕ_r proche de 0° que pour celles proche de 180° (pour la clarté des dessins, les directions $\phi_r = 135^\circ$ et $\phi_r = 170^\circ$ ne sont pas représentées, car elles donnent des résultats similaires à ceux obtenus pour $\phi_r = 180^\circ$).

Afin de vérifier que les phénomènes observés avec les courbes des figures 4.19 et 4.20 ne sont pas liés à un artefact des surfaces générées, le coefficient de «masquage / ombrage» C a été calculé dans les mêmes conditions et sur les mêmes surfaces. Mais, une rotation de ces surfaces a été préalablement effectuée avec un angle d'isotropie δ égal à 0° , 90° , 180° et 270° .

Ainsi, pour chaque combinaison des directions d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) et pour chaque rugosité r des surfaces, quatre valeurs de C sont déterminées. Les phénomènes précédents sont à nouveau constatés et les écarts relatifs entre ces valeurs et leur moyenne est toujours inférieur à 3% pour les surfaces de petite rugosité. Pour la surface la plus rugueuse ($r = 1$), ces écarts relatifs dépendent de l'angle d'observation θ_r . Cependant, leurs variations sont faibles puisque leur maximum est de 15% et qu'il correspond à des valeurs peu significatives de C .

Ces nouveaux résultats démontrent que l'angle δ n'a pas d'influence sur le coefficient de «masquage / ombrage» C . Ceci n'est pas surprenant, car le principe de génération des surfaces gaussiennes respecte leur propriété d'isotropie (cf. annexe A.1).

4.2.4 Conclusion

Dans le paragraphe 4.2.3.2, l'influence de la direction d'observation ϕ_r sur les valeurs du coefficient de «masquage / ombrage» C a donc été clairement démontrée (figures 4.19 et 4.20). Les modèles théoriques, que ce soit celui de Beckmann-Smith ou celui de Wagner (§ 2.3.4.1), ne permettent pas actuellement de décrire cette propriété, car ils supposent que le coefficient C est indépendant de ϕ_r .

Cependant, dans le plan d'éclairage, c'est-à-dire pour ϕ_r égal à 0° et à 180° , il a été vérifié que ces modèles sont corrects pour décrire le coefficient C . Il en découle que ces modèles permettent aussi de décrire le coefficient de masquage S , qui reste un cas particulier du coefficient de «masquage / ombrage» C .

4.3 Influence des propriétés photométriques du matériau de la surface

Cette étude a pour objectif de mesurer qualitativement l'influence des propriétés photométriques du matériau de la surface sur le coefficient de luminance de cette surface. Les caractéristiques optiques du matériau sont prises en compte par l'intermédiaire d'une BRDF¹ associée à chacune des facettes de la surface. Trois types de BRDF sont utilisées :

- une «BRDF spéculaire» définie par un indice de réfraction $n = 1,5$,
- une «BRDF diffuse» avec un facteur de réflexion $\rho = 1$,
- une «BRDF aléatoire» résultat du mélange des deux BRDF précédentes avec un facteur de réflexion spéculaire ρ_r de 0,5 et un facteur de réflexion diffuse ρ_d égal à 0,5 (§ 1.2.2.2).

Les «BRDF spéculaire» et «BRDF diffuse» supposent que le matériau de la surface est constitué d'un seul élément parfaitement homogène. Comme cela a été signalé au paragraphe 3.2.4.2, l'utilisation de ces deux BRDF signifie respectivement que la surface ne possède pas de microtexture ou qu'elle a une microtexture «parfaite» dans le sens où celle-ci ne donne pas de direction privilégiée à la lumière réfléchie. À l'inverse, la «BRDF aléatoire» peut être interprétée de deux manières. Soit elle représente la BRDF d'un matériau constitué de deux éléments uniformément et aléatoirement répartis, l'un spéculaire et l'autre diffusant, soit elle est la BRDF d'un matériau homogène et qui est la somme d'une composante spéculaire et d'une composante diffuse.

Ces trois types de BRDF ont été appliqués sur des surfaces de différentes rugosités ($r = 1$, $r = 0,5$, $r = 0,25$ et $r = 0,1$) et le coefficient de luminance de ces surfaces a été déterminé pour trois angles d'éclairage ($\theta_i = 0^\circ$, $\theta_i = 60^\circ$ et $\theta_i = 80^\circ$). Sur les figures 4.21 à 4.24, les coefficients de luminance q (multipliés par le cosinus de l'angle d'observation θ_r) de ces simulations sont présentés dans le plan d'éclairage et en coordonnées polaires.

Tout d'abord, pour les surfaces dont le matériau se caractérise par une «BRDF spéculaire», la forme de l'indicatrice de diffusion dépend beaucoup de la rugosité de la surface. Si la surface est «lisse» (les valeurs de r sont petites), le coefficient de luminance a un comportement du type spéculaire qui s'accroît quand l'angle d'éclairage θ_i augmente. Le lobe qui s'étale autour de la direction de specularité a alors une amplitude de plus en plus grande et la lumière qui est rétrodiffusée devient nulle. En revanche, si la surface est très rugueuse ($r = 1$) son comportement est totalement différent puisque la rétrodiffusion est prépondérante. Cependant, cette surface ne se caractérise pas par une rétro réflexion (§ 1.2.1.2), car aucun pic n'est observé dans la direction d'incidence. Les surfaces de rugosité intermédiaire ($r = 0,5$ et dans une moindre mesure, $r = 0,25$) ont une indicatrice de diffusion qui présente à la fois un lobe de specularité et une rétrodiffusion. Cette dernière diminue à mesure que l'incidence est rasante.

1. Voir note 4 du paragraphe 3.2.4.2.

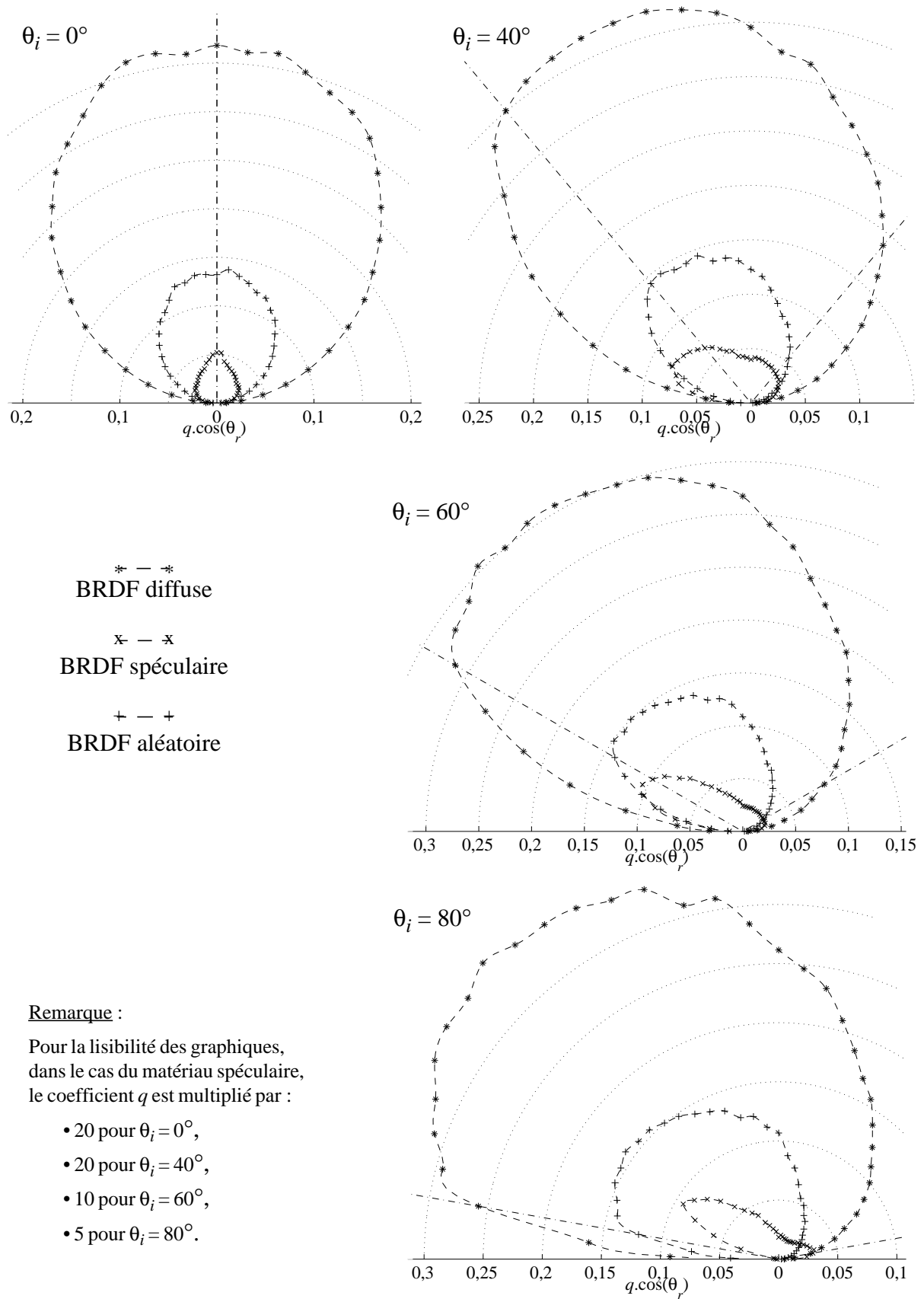


Figure 4.21 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 1$.

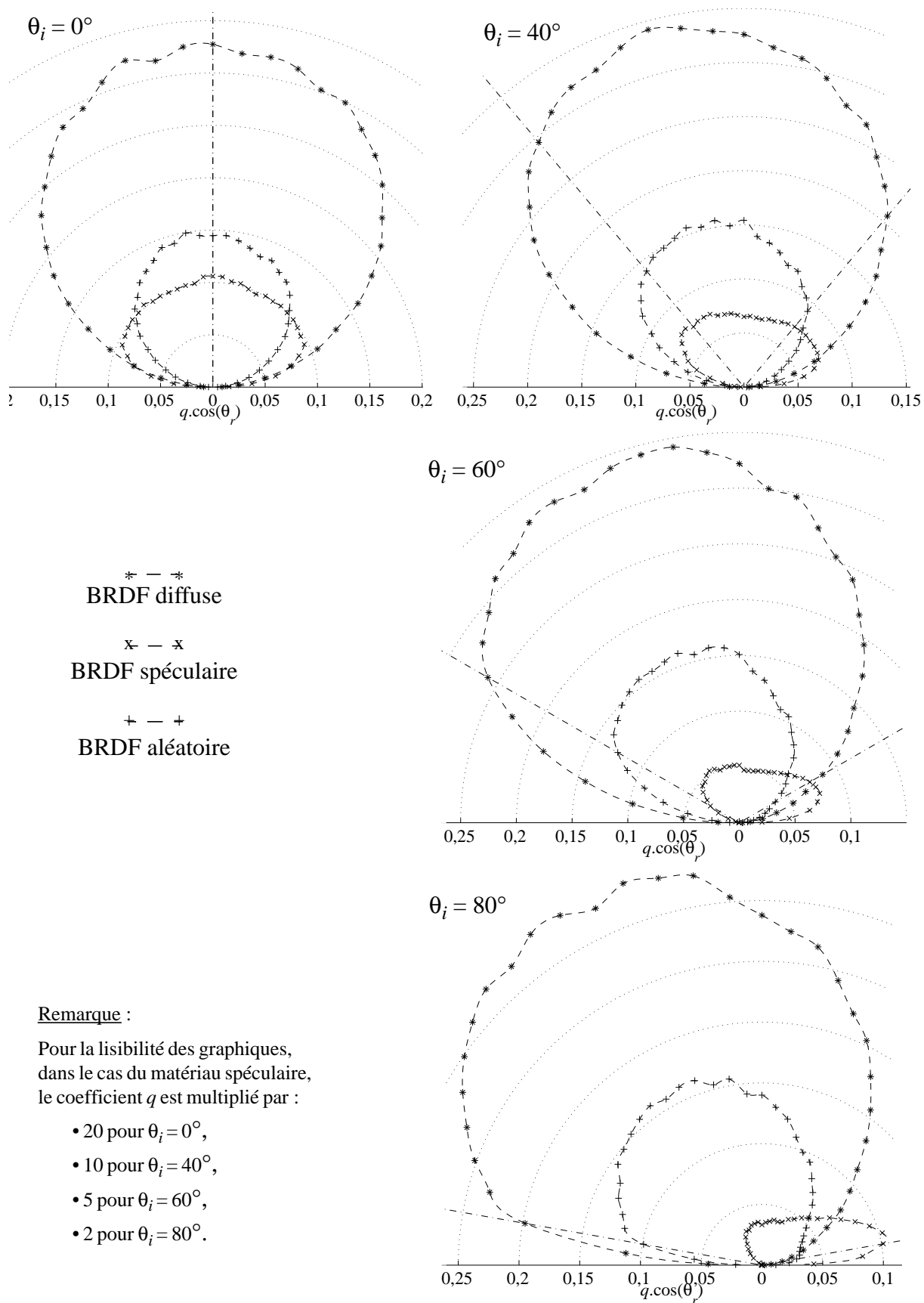


Figure 4.22 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,5$.

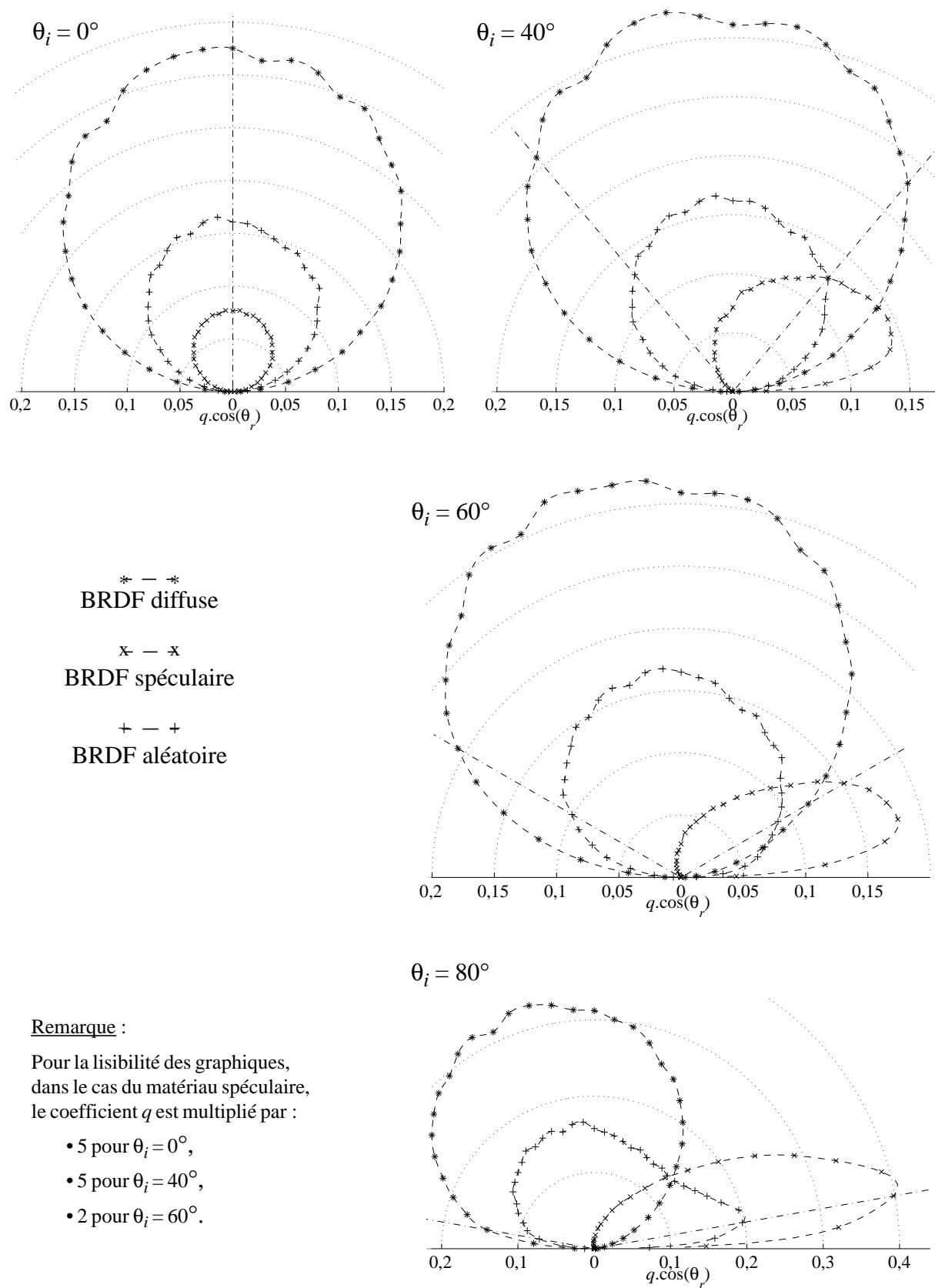


Figure 4.23 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,25$.

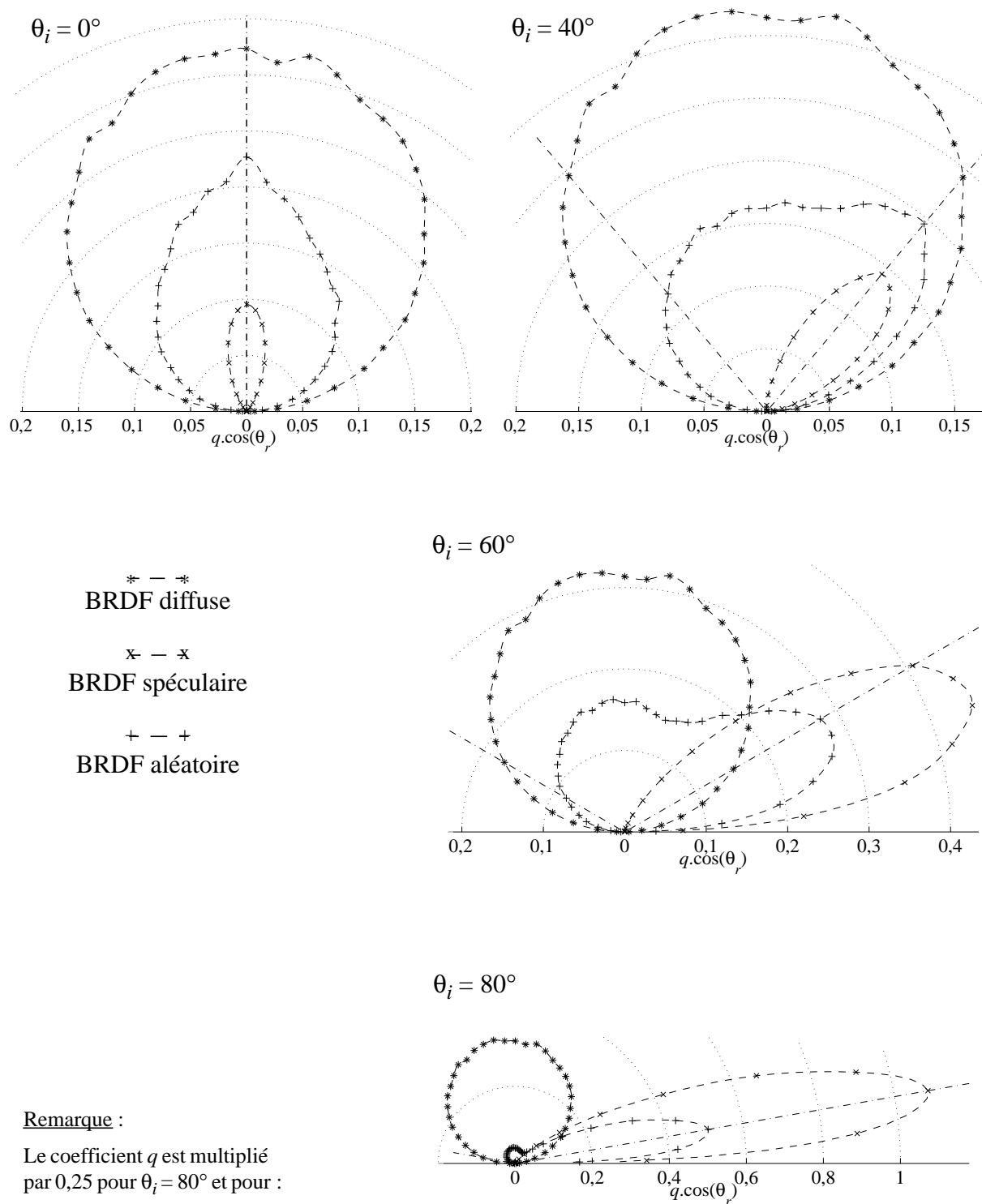


Figure 4.24 Coefficient de luminance d'une surface de rugosité $r = 0,1$.

Pour les surfaces dont le matériau possède une «BRDF diffuse», le coefficient de luminance de la surface est du type lambertien. Mais, l'angle d'éclairage θ_i modifie la forme de l'indicatrice de diffusion par une sorte de rotation de celle-ci vers la direction d'incidence. Cet effet est d'autant plus marqué que la surface est rugueuse. Pour les plus grandes rugosités ($r = 1$ et $r = 0,5$), la rétrodiffusion devient prépondérante. Mais encore une fois, aucune rétro-réflexion n'apparaît.

Les surfaces à «BRDF aléatoire» ont un comportement intermédiaire à celui observé pour les surfaces à matériau purement spéculaire ou purement diffusant. Pour les surfaces très rugueuses, la surface est donc principalement rétrodiffusante, mais pour les angles rasants un petit pic est toutefois observé dans la direction de specularité. À l'inverse, pour les surfaces «lisses», le coefficient de luminance est très spéculaire. Pour les incidences rasantes, la composante diffuse est «écrasée» par le lobe de specularité. Dans tous les cas, le coefficient de luminance de la surface apparaît comme la somme pondérée des coefficients de luminance des surfaces à «BRDF spéculaire» et à «BRDF diffuse».

Pour les surfaces «lisses» ($r = 0,1$ et $r = 0,25$), ces coefficients de pondération sont respectivement égaux aux valeurs de ρ_r et ρ_d de la «BRDF aléatoire» du matériau. En revanche, pour les surfaces à rugosité plus grande ($r = 1$ et $r = 0,5$), les valeurs de ces coefficients sont différentes car les proportions des réflexions multiples doit être prises en compte. En effet, pour ces surfaces, le paragraphe 4.1 a montré que les réflexions multiples sont nombreuses et que leur contribution au coefficient de luminance n'est pas négligeable. Pour une surface dont le matériau à une «BRDF aléatoire», les proportions des réflexions multiples est intermédiaire à celles données par les figures 4.2 et 4.6. Cependant, à cause du comportement aléatoire du mode de réflexion des rayons, la répartition spatiale de ces rayons, ainsi que leur énergie, sont très différentes des cas purement spéculaire et purement diffusant. Dans ces conditions, les valeurs des coefficients de pondération dépendent de la rugosité de la surface et de l'angle d'éclairage θ_i . À titre d'exemple, le coefficient affecté à la «BRDF diffuse», qui est prépondérante, est 0,37 et 0,40 pour θ_i respectivement égal à 0° et 60° ($r = 1$), puis de 0,45 et 0,46 pour les mêmes angles et $r = 0,5$ (le coefficient affecté à la «BRDF spéculaire» est fixé à 0,5).

Enfin, il faut noter que sous une incidence normale $\theta_i = 0^\circ$ et pour tous les types de matériau, la rugosité de la surface ($r = 1$, $r = 0,5$ et $r = 0,25$) conduit à un coefficient de luminance du type diffusant sans direction privilégiée.

Remarque :

Les résultats observés dans le cas où le matériau est caractérisé par une «BRDF aléatoire» dépendent fortement des valeurs utilisées pour les facteurs de réflexion spéculaire ρ_r et diffuse ρ_d . Plus le facteur ρ_r est grand devant le facteur ρ_d , plus le coefficient de luminance de la surface ressemble à celui obtenu pour un matériau purement spéculaire. Inversement, si ρ_d est supérieur à ρ_r , alors le coefficient de luminance tend vers celui dû à un matériau parfaitement diffusant.

CHAPITRE 5

Application du goniophotomètre virtuel aux revêtements de chaussées

Le chapitre 4 a montré les nombreuses possibilités d'étude qui sont offertes par l'utilisation du goniophotomètre virtuel. Cependant, les études réalisées n'ont porté que sur des surfaces synthétiques à «profil gaussien». Il est maintenant intéressant de les étendre à des surfaces plus réalistes, par exemple des revêtements de chaussée. Mais avant d'aller plus loin, une description simple de ce type particulier de surface est donnée (§ 5.1).

Pour calculer le coefficient de luminance d'un échantillon de revêtement, il est nécessaire d'en mesurer son profil. Malheureusement, de nombreuses difficultés ont été rencontrées ce qui fait que le nombre d'échantillons mesurés est très limité (§ 5.2). Malgré ces problèmes, il a été recherché les différents paramètres statistiques qui caractérisent les profils (§ 5.3). Ce travail démontre surtout qu'il existe de grandes différences entre les profils des types de revêtements. Il met également en lumière différents problèmes qu'il faudra résoudre pour pouvoir définir une classification des profils de ces surfaces.

Enfin, dans le paragraphe 5.4, les profils sont utilisés pour étudier différents phénomènes liés à la réflexion de la lumière. Le canevas du chapitre 4 est repris ici. D'une manière générale, l'ensemble des résultats obtenus donnent une bonne idée du comportement des revêtements de chaussée. Cependant, à cause du petit nombre d'échantillons étudiés, ils ne peuvent pas à l'heure actuelle être généralisés au type de revêtement auquel appartient ces différents échantillons.

5.1 Présentation des revêtements de chaussée

5.1.1 Qu'est-ce qu'un revêtement de chaussée?

Une chaussée a pour but de permettre la circulation en toute saison, dans des conditions suffisantes et aussi durables que possible de confort et de sécurité. À cette fin, elle est constituée de plusieurs couches de natures différentes qui ont chacune des rôles bien spécifiques. La couche de surface, encore appelée couche de roulement ou revêtement, est la couche supérieure de la chaussée qui se trouve en contact direct avec l'extérieur, en particulier avec les pneumatiques. C'est uniquement elle qui est vue par l'automobiliste. Outre des propriétés d'étanchéité (pour protéger les couches inférieures), la couche de roulement doit aussi présenter une bonne rugosité (pour assurer l'adhérence), avoir un bon uni (pour garantir le confort) et une bonne résistance au fluage (pour éviter les phénomènes d'orniérage).

Les spécifications propres aux problèmes de l'éclairage ne sont pas prises en considération par les concepteurs de revêtements. Pour augmenter la luminance de ces surfaces, il semble *a priori* qu'elles devraient être de couleur claire et peu salissante (ou auto-nettoyante).

Tous les revêtements sont le résultat d'un mélange parfaitement dosé de granulats et de liants. Avant de décrire les deux principaux types de revêtements que sont les enrobés (§ 5.1.1.2) et les enduits (§ 5.1.1.3), leurs constituants sont présentés.

5.1.1.1 Les constituants d'un revêtement

a. Les granulats

Les granulats sont très largement majoritaires dans les différentes couches des chaussées et dans la couche de roulement ils constituent plus de 95% en poids du mélange sec, c'est-à-dire en excluant le liant.

Un granulat est caractérisé par sa **granularité** qui représente la distribution dimensionnelle de ses grains. Cette distribution, ou **courbe granulométrique**, est le résultat d'un tamisage à l'aide d'un tamis à mailles carrées de dimensions normalisées. Ainsi, une **classe granulaire** est définie par deux dimensions d'ouverture de maille exprimées en millimètres (par exemple 4/6 mm). L'ensemble des granulats d'un revêtement se divise en plusieurs classes, chacune étant composée d'un constituant particulier :

- des sables de calibre 0/2 ou 0/4 mm,
- des petits gravillons de calibre 2/4, 2/6, 4/6, 4/10 ou 6/10 mm,
- des gros gravillons de calibre 10/14 ou 10/20 mm.

En fonction des classes utilisées, deux grands types de courbes granulométriques sont distinguées : les courbes continues (dans lesquelles toutes les classes granulaires sont repré-

sentées de 0 à D mm) et les courbes discontinues (dans lesquelles il manque une ou plusieurs classes granulaires intermédiaires).

D'autres paramètres caractérisent la forme, l'angularité, la microrugosité et la résistance mécanique des granulats. Ce sont des données importantes, car elles influent sur l'adhérence des revêtements. Elles dépendent beaucoup de la nature de la roche qui compose le granulat ; ces roches sont des roches volcaniques (rhyolites), des roches sédimentaires (sables, grès, calcaires) ou des roches métamorphiques (quartzites). Dans la majorité des cas, la roche utilisée dans un revêtement, qui provient des carrières proches du chantier, dépend beaucoup de la région géologique où se trouve ce chantier.

b. Les liants

Un liant est un liquide très visqueux à des températures de l'ordre de 100 à 200° C qui se présente à l'état pseudo-solide à température ambiante. Il existe deux grandes familles de liants : les bitumes et les goudrons. Les **bitumes** sont des liants hydrocarbonés issus de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts (dits bruts à bitume). Ils sont composés d'asphaltes (sous forme solide) en solution dans des maltènes (sous forme liquide). Les **goudrons** sont également composés d'hydrocarbures, en l'occurrence des benzènes, mais ils proviennent de la distillation de la houille. De nos jours, ils sont de moins en moins utilisés sauf dans des cas particuliers pour leur résistance aux hydrocarbures (parkings d'aéroport, stations-services).

Tous les liants sont de couleur noire. Dans les différents revêtements, ils apparaissent purs ou modifiés par l'ajout de polymères. Mais, il est apparu récemment sur le marché de nouveaux types de liant. Ce sont des liants de synthèse utilisant une chimie complexe qui peuvent être colorés par l'ajout d'additifs (par exemple, l'utilisation de l'oxyde de titane TiO_2 donne un liant de couleur blanc crème).

5.1.1.2 Les enrobés

Un enrobé, ou un béton bitumineux (BB), est un mélange préfabriqué à chaud dans une centrale d'enrobage, répandu ensuite sur la chaussée puis compacté. Ce mélange est constitué de granulats et d'un liant précisément dosé qui enrobe tous les éléments du mélange d'une fine pellicule.

Pour augmenter la compacité du revêtement, c'est-à-dire diminuer le volume de «vides» qu'il contient, des **fines** ou «**filler**» sont ajoutées au mélange¹. Ce sont de petites particules, dont la taille maximale est de 80 μm . Il en existe deux sortes :

- les fines naturelles produites lors du concassage ou du broyage des matériaux et qui sont principalement contenues dans le sable ;
- les fines d'apport introduites dans le mélange au niveau de la centrale d'enrobage et qui sont des roches calcaires, de la chaux ou du ciment.

1. Par la suite, le terme **mastic** est souvent utilisé. Ce terme désigne le mélange des fines et du liant, c'est-à-dire la «pâte» qui entoure les granulats.

Ces fines représentent de 1 à 6% du mélange sec, le reste étant constitué par les granulats.

Les nombreuses formulations d'enrobés sont classées en fonction de leur épaisseur de mise en oeuvre. Cette épaisseur varie de 2 à 8 cm et plus elle est faible, plus le prix au mètre carré du revêtement est bas. Ainsi, le «**Béton Bitumineux Très Mince**» est le plus économique des enrobés, car son épaisseur n'est que de 2 à 2,5 cm. Il est très utilisé pour l'entretien des chaussées peu déformées ou pour obtenir sur une chaussée neuve des caractéristiques de surface élevées. Il recouvre principalement les voies très circulées, par exemple les autoroutes et les routes nationales.

Le «**Béton Bitumineux Drainant**» (épaisseur de 4 cm), est utilisé pour ses propriétés de drainage de l'eau qui limitent ainsi les projections et les risques d'aquaplanage (il a été également remarqué que ce type d'enrobé diminue le bruit de roulement). Il se caractérise par une courbe granulométrique présentant une discontinuité très marquée, ce qui permet d'obtenir une teneur en «vides» comprise entre 20 et 25%.

Avec des épaisseurs plus grandes, les «**Bétons Bitumineux Mince**s» (épaisseur de 4 à 6 cm) et les «**Bétons Bitumineux Semi-Grenus**» (épaisseur de 6 à 8 cm) apportent un complément de structure à la chaussée. Ils sont donc utilisés pour la construction de nouvelles routes ou pour l'entretien des chaussées très abîmées.

La courbe granulométrique des formulations précédentes peut être continue ou discontinue. D'une manière générale, l'emploi en proportion importante de sables 0/2 ou de granulats 0/4 associé à une granulométrie continue donne une surface d'aspect «lisse». Le revêtement, qui présente des trous peu profonds, est dit «**fermé**» : c'est le cas du BBM et du BBSG. Inversement, si l'enrobé a une courbe granulométrique discontinue, il présente alors des trous profonds et nombreux, c'est-à-dire qu'il fait apparaître en surface ses plus gros granulats. Cet enrobé est dit «**ouvert**» : c'est le cas du BBDr et du BBTM.

5.1.1.3 Les enduits

Les enduits, ou **enduits superficiels** (ES), se démarquent des enrobés par une technique de fabrication totalement différente. Cette technique est la suivante :

- répandage d'un (ou plusieurs) film(s) de bitume,
- répandage d'une (ou plusieurs) couche(s) de granulats.

En fonction du nombre de combinaisons de ces couches, différents types d'enduits sont définis : les enduits monocouches avec simple ou double gravillonnage (un film de liant suivi d'une ou plusieurs couche(s) de gravillons) et les enduits bicouches (une première couche de liant et de gravillons puis une seconde).

Contrairement aux enrobés, les enduits n'ont pas une formulation bien précise. En effet, les granulats sont répandus en grande quantité et seulement ceux qui adhèrent au liant restent sur le revêtement. Les autres sont décollés par le passage des véhicules et projetés vers les bas cotés de la chaussée. Dans ces conditions, les seules caractéristiques connues des enduits sont les différentes classes granulaires utilisées.

Les enduits sont les revêtements les plus économiques à mettre en oeuvre. Ils sont donc très répandus sur le réseau routier français, en particulier sur toutes les routes de seconde catégories (certaines nationales, les départementales) peu circulées et sur lesquelles la vitesse est modérée.

5.1.2 Caractéristiques des revêtements mesurés

Les types de revêtements mesurés ont été choisis de manière à représenter l'ensemble des revêtements utilisés en France. Les deux tableaux 5.1 et 5.2 récapitulent toutes les informations pratiques sur les échantillons utilisés par la suite, soit cinq formules d'enrobé et une d'enduit. Les renseignements les plus importants concernent l'âge et la composition de ces revêtements avec en particulier :

- leur **formulation**, qui donne les dimensions des classes granulaires et leurs proportions en pour cent du poids total du mélange,
- leur **nature**, qui donne le type de roche des différents granulats et le type de liant.

Les formulations rappelées dans ces tableaux sont propres aux échantillons mesurés. Pour d'autres échantillons d'un même type de revêtement, des variations sur les proportions des classes granulaires peuvent être observées. Cependant, celles-ci resteront toujours faibles, car ce sont ces proportions particulières qui définissent la nature d'un revêtement.

Enfin, les images de la figure 5.1 montrent l'aspect des différents type de revêtements. Ces images ont été obtenues à partir des mesures des profils (*cf.* § 5.2).

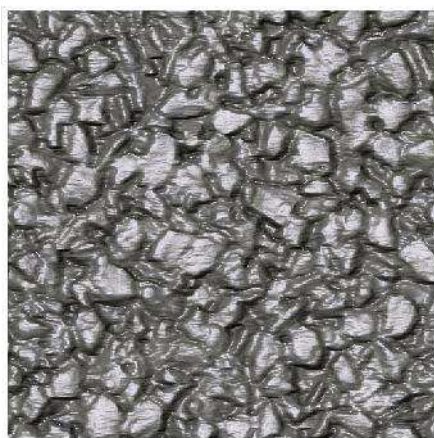
Famille	BBDr		BBTM
N°	385/387	392/393	464
Type	0/10 à 20% de vide	0/10 à 30% de vide	0/10
Age	12 mois	12 mois	3 mois
Formulation	87% de 6/10 12% de 0/2 1% de chaux 5% de liant	97,8% de 6/10 2% de filler 0,2% de fibre 4,7% de liant	65% de 6/10 33% de 0/2 2% de colorant 5% de liant
Provenance			Inzinzac
Nature	Quartzite Calcaire Colflex S 30/50 ppc	Quartzite Filler C Colflex S 30/50 ppc	Quartzite Calcaire TiO ₂ Mexphalt CP2 35/50 ppc

Tableau 5.1 : Composition des BBDr et du BBTM.

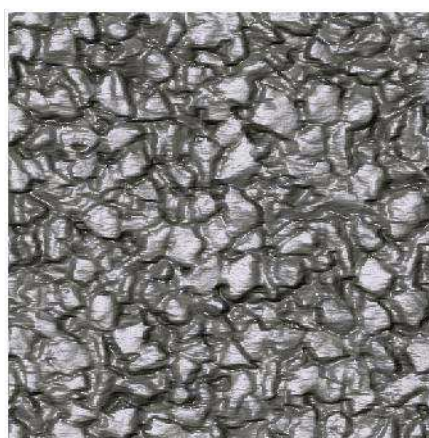
Famille	BBM	BBSG	ES
N°	492	496	523/524
Type	0/10	0/10	Monocouche double gravillonnage
Age	9 mois	7 mois	1 an
Formulation	50% de 4/10 49% de 0/4 1% de filler 5,8% de liant	35% de 6/10 29% de 2/6 35% de 0/2 1% de filler 6% de bitume	4/6 10/14 monocouche de liant
Provenance	Vignats	Vignats	La Meilleraie
Nature	Quartzite Quartzite	Quartzite Quartzite Calcaire 50/70	Rhyolites

Tableau 5.2 : Composition du BBM, du BBSG et des ES.

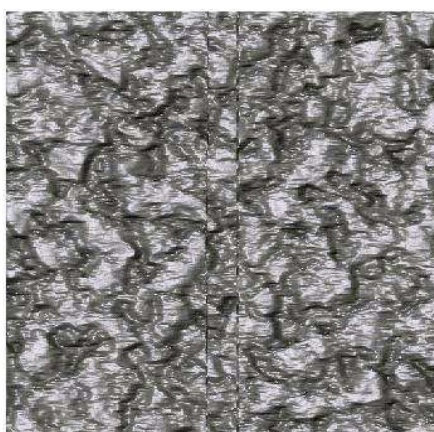
BBDr 0/10 à 20% de vide
échantillon n° 385



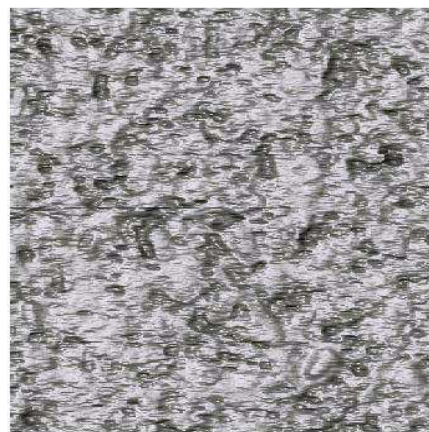
BBDr 0/10 à 30% de vide
échantillon n° 393



BBTM 0/10
échantillon n° 464



BBM 0/10
échantillon n° 492



BBSG 0/10
échantillon n° 496



ES 4/6 - 10/14
échantillon n° 523



Figure 5.1 Images des différents types de revêtements mesurés.

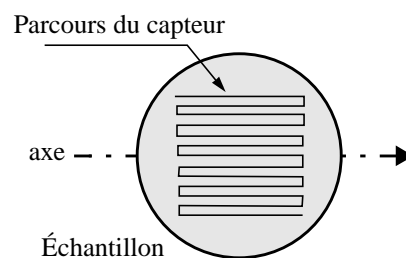
5.2 Mesure des profils de surfaces

Le LCPC de Nantes dispose d'un outil, appelé TRIDIM, qui permet de relever le profil d'une surface. TRIDIM a été spécialement conçu pour caractériser la texture des revêtements de chaussée dans le cadre de recherches sur les contacts entre les pneumatiques et la chaussée dans le but d'étudier d'une part, les phénomènes d'adhérence et d'autre part, le bruit de roulement des véhicules.

5.2.1 Principe de la mesure

La mesure de l'altitude en un point de la surface se fait par un procédé optique. Cette mesure sans contact entre l'appareil et l'échantillon n'est pas destructive et la surface de l'échantillon n'est pas altérée. Ainsi, le profil de l'échantillon peut être relevé plusieurs fois et son coefficient de luminance à nouveau mesuré.

Pour réaliser un relevé complet du profil d'un échantillon, le capteur mesurant l'altitude doit être déplacé au dessus de la surface de cet échantillon. Pour cela, le capteur est monté sur un ensemble mécanique qui permet de le mouvoir sur un plan horizontal «parallèle» à la surface mesurée. Les déplacements suivant les axes Ox et Oy sont assurés par deux moteurs pas-à-pas. Les caractéristiques de ces moteurs font que le pas minimum de déplacement est de $10\text{ }\mu\text{m}$ pour une amplitude totale de 190 mm .



Pour déterminer l'altitude au point de mesure, le capteur utilise une méthode de triangulation par laser. Ce capteur est constitué d'une source laser et d'un détecteur de position, en l'occurrence un photodétecteur. Ce photodétecteur détermine la position du maximum d'intensité du signal lumineux reçu et fournit un signal électrique proportionnel à la position de ce maximum. Le principe de fonctionnement de l'ensemble du capteur est représenté sur la figure 5.2.

Le faisceau de la diode laser se focalise au point A de la surface par l'intermédiaire d'un système optique SO_1 . En fait, ce système optique est conçu pour avoir une profondeur de champ $A'A''$ la plus grande possible, c'est-à-dire pour que l'amplitude de mesure Δh soit importante. Mais, à cause de la taille réduite du photodétecteur, un compromis doit être trouvé entre l'amplitude des mesures et la précision souhaitée pour la mesure de l'altitude : plus Δh est importante, moins la mesure est précise, et *vice versa*.

L'incidence du faisceau est normale à la surface mesurée. La tache lumineuse au point A est vue depuis le détecteur sous un angle α_0 . Sur le détecteur de position, elle correspond au point B . Les points A et B permettent ainsi de définir une altitude h_0 de référence : $h_0 = d / \tan(\alpha_0)$. À une modification de l'altitude h dans l'intervalle $A'A''$ correspond alors un déplacement du point de focalisation sur le photodétecteur dans l'intervalle $B'B''$.

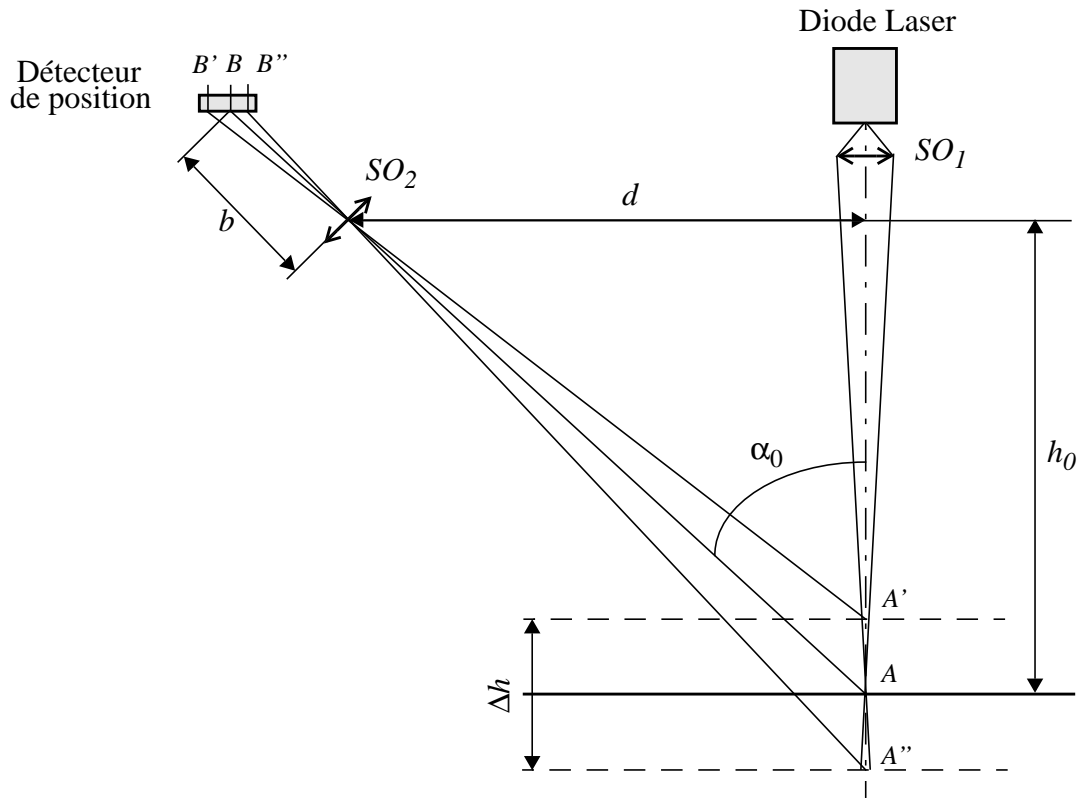


Figure 5.2 Schéma de fonctionnement du détecteur d'altitude de TRIDIM.

En utilisant les notations de la figure 5.3, la relation entre la hauteur mesurée h au point P et le déplacement \overline{BQ} sur le photodétecteur peut se calculer facilement. En effet, les quantités x et y sont données par les égalités suivantes :

$$x = \overline{BQ} + b \sin(\alpha_0)$$

$$y = b \cos(\alpha_0)$$

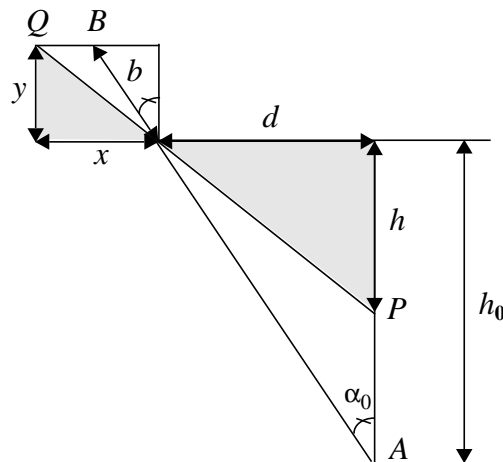


Figure 5.3 Principe de la mesure par triangulation : relation entre la hauteur mesurée et le déplacement observé par le photodétecteur.

De plus, les deux triangles grisés de la figure 5.3, permettent de relier x et y à la grandeur caractéristique d du capteur :

$$\frac{d}{h} = \frac{x}{y}$$

Finalement, en substituant les définitions de x et y dans l'égalité précédente et en faisant une transformation simple, l'altitude h au point P est donnée par :

$$h = \frac{db \cos(\alpha_0)}{BQ + b \sin(\alpha_0)}$$

Les longueurs b et d , ainsi que l'angle α_0 , sont fixées par la construction de l'ensemble «détecteur / source lumineuse» du capteur.

Les caractéristiques du capteur données par son constructeur sont les suivantes :

- L'amplitude de mesure Δh est de 20 mm.
- L'erreur de mesure de la hauteur est de 25 μm .
- La tache projetée a un diamètre de 100 μm .
- Le signal analogique en sortie du capteur est numérisé sur 12 bits, soit 4096 niveaux (ce nombre dépend de la carte de conversion utilisée).

5.2.2 Limitations de la mesure

L'erreur de mesure de la hauteur donnée par le constructeur du capteur est une erreur théorique. Lors de la mesure d'une surface quelconque, des valeurs aberrantes de l'altitude peuvent être fournies par le capteur (*cf.* [BUZ 92] et [SOU 90]). Quatre phénomènes sont à l'origine de ces problèmes :

- Le facteur de réflexion ρ du matériau de la surface est variable (fig. 5.4.a).
- La surface contient des arêtes vives (fig. 5.4.b).
- La surface présente vis-à-vis de la source des discontinuités (fig. 5.4.c).
- Le point de mesure est correctement éclairé mais il est partiellement masqué pour le détecteur (fig. 5.4.d).

Dans tous ces cas, l'altitude donnée par le capteur sera différente de l'altitude réelle du point de la surface. Cette erreur provient du fait que le signal reçu par le photodétecteur n'est plus un faisceau parfaitement gaussien et le maximum d'intensité détecté n'est plus au centre de la tache du spot. Dans le dernier cas, si le spot est totalement masqué, alors le capteur détecte l'absence de signal et renvoie une valeur par défaut. Contrairement aux autres cas, le problème du masquage total du spot peut donc être facilement corrigé par un traitement des

données. Par ailleurs, pour éviter tous les effets de masquage, l'altitude du point considéré peut être mesurée une deuxième fois en tournant par exemple le capteur de 90° . Le recoupement des deux profils permet alors d'éliminer les points aberrants. Le défaut de cette technique est que le temps de mesure est multiplié par deux.

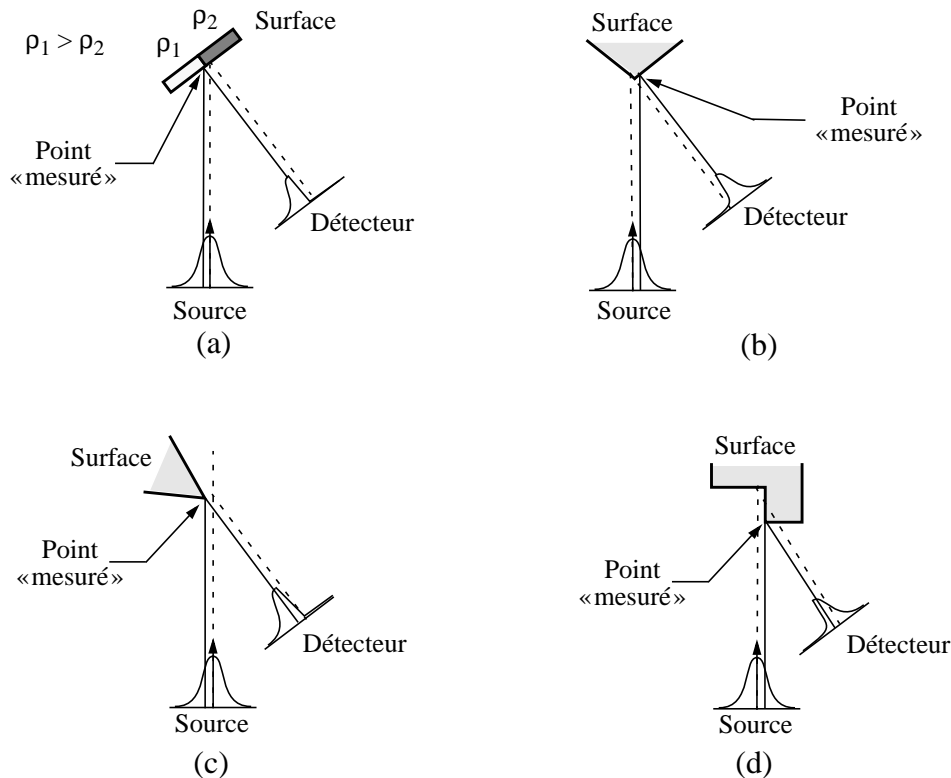


Figure 5.4 Cas d'une mauvaise mesure de l'altitude dans les méthodes de triangulation.

Il existe une autre source d'erreur dont l'origine est liée à l'utilisation d'une source de lumière cohérente. En effet, une source laser engendre sur la surface des effets de Speckel et un raisonnement théorique permet de quantifier ces erreurs [BAR 91]. Dans les mesures qui ont été faites sur les revêtements de chaussées, elles restent négligeables par rapport aux autres sources d'erreur.

La mesure du profil d'une surface par la méthode de la triangulation par laser n'est pas applicable à tous les types de surface. Comme l'observation de la tache projetée sur la surface se fait sous un certain angle α_0 (fig. 5.2), il est nécessaire que le matériau de la surface soit diffusant. Dans le cas contraire, aucun signal n'arrive sur le détecteur donc aucune mesure n'est possible. Par ailleurs, si le matériau est très absorbant, la quantité de lumière réfléchiée peut devenir faible. Dans ces conditions, l'amplitude du signal est petite et son maximum est plus difficile à déterminer précisément, ce qui peut conduire à une valeur erronée de l'altitude. Pour remédier à ce problème, la puissance de la diode doit être modulée en fonction de l'intensité du signal reçu. Malheureusement, pour les matériaux très sombres, ce système reste inefficace et la mesure de l'altitude est impossible.

Enfin, il faut noter que le principe de la mesure ne permet pas de relever les cavités qui se trouvent sous des aplombs. Ceci n'est pas trop gênant puisque le goniophotomètre virtuel ne permet pas de prendre en compte ces mêmes cavités et aplombs.

5.2.3 Corrections apportées aux mesures

Pour réaliser la mesure du profil d'une surface, le capteur doit être déplacé dans un plan horizontal «parallèle» à cette surface (§5.2.1). Dans la plupart des cas, cette condition n'est pas respectée, car le plan moyen de l'échantillon est très difficile à déterminer. Le résultat de la mesure est donc la somme des hauteurs du profil «vrai» et d'un plan dont les pentes sont différentes suivant les axes Ox et Oy . Avant d'utiliser les profils mesurés, il est donc nécessaire de «redresser» la surface en enlevant ce plan parasite.

Un autre problème consiste à définir un plan de référence pour les données. Ce plan de référence doit d'une part, respecter la forme géométrique du profil et suivre (ou lui être parallèle) la direction générale du profil sur toute la longueur de mesure. D'autre part, ce plan doit diviser en deux parties égales le profil qui se trouve au-dessus et en dessous de ce plan. Ces deux conditions assurent que les données peuvent être redressées en respectant le plan de référence et que ce plan de référence est un plan moyen.

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer les caractéristiques d'un tel plan de référence. Cependant, d'après un rapport européen sur les méthodes de caractérisation des surfaces rugueuses [STOUT], la meilleure solution consiste à déterminer le «plan moyen au sens des moindres carrés». Ce plan est défini de telle sorte que la somme χ^2 des carrés des écarts entre la surface mesurée et ce plan soit minimale (dans l'annexe A.3, les développements mathématiques du calcul des coefficients de ce plan sont expliqués).

Par définition, le «plan moyen au sens des moindres carrés» est unique. Après avoir retranché ce plan aux données initiales, les résidus deviennent les nouvelles hauteurs de la surface traitée. Par définition, leur écart-type est minimum et leur moyenne est nulle, ce qui signifie que le nouveau plan de référence est horizontal et défini par $z = 0$. Il faut noter que le «plan moyen au sens des moindres carrés» a la propriété de scinder la surface en deux parties pour lesquelles les volumes des «montagnes» et des «vallées» sont identiques. Il constitue un cas particulier des plans à moyenne arithmétique centrée.

5.3 Études des profils mesurés

Au total, neuf échantillons ont été mesurés. Ils sont issus de différents chantiers et représentent cinq types de revêtements de chaussée : un BBDr à 20% de vide, un BBDr à 30% de vide, un BBTM, un BBM, un BBSG et un ES.

5.3.1 Remarques préliminaires

5.3.1.1 Les paramètres des mesures

Dans les paragraphes 5.3.2.2 et 5.3.2.3, une étude statistique de différents profils de revêtements routiers est présentée. Lors de la mesure de ces profils, les paramètres utilisés ont été les suivants :

- nombre de points d'échantillonnage $M = N = 512$ points,
- pas d'échantillonnage $\Delta x = \Delta y = 0,240$ mm,
- largeur totale de la surface échantillonnée $L_x = L_y = 122,64$ mm.

Le nombre de points d'échantillonnage peut être plus grand, mais le temps nécessaire à une mesure complète d'une surface en limite le nombre (avec les conditions précédentes, la mesure d'une surface prend approximativement huit heures). La taille de la surface totale mesurée a été choisie de telle sorte que sa largeur soit du même ordre de grandeur que celle de la surface éclairée par le goniophotomètre du laboratoire (§3.1). Les conditions sur le nombre de points d'échantillonnage et sur la taille de la surface mesurée ont donc fixé de manière arbitraire la valeur du pas d'échantillonnage.

Dans une étude plus approfondie des profils des revêtements routiers, il serait nécessaire de regarder l'influence de la valeur du pas d'échantillonnage sur les propriétés statistiques de ces surfaces. En effet, un pas trop grand entraîne une mauvaise description de la macrotexture de la surface. Dans ces conditions, les profils utilisés dans une simulation du goniophotomètre virtuel apparaissent plus lisses que la surface réelle (ceci est lié à la description de la surface des facettes par des quadriques (§3.2.4.1)). À l'inverse, si le pas d'échantillonnage est très petit, la description de la macrotexture est très fine. L'inconvénient est que pour une taille de l'échantillon mesuré fixée (par exemple, 120x120 mm), la quantité de données devient très importante et peut poser des difficultés pour son utilisation avec le goniophotomètre virtuel².

2. Pour l'instant, l'échantillonnage maximum qui a été utilisé par le goniophotomètre virtuel est de 1024x1024 points. Indépendamment des problèmes de mesure des profils, ceci permet donc d'avoir une surface mesurée de 122,76 mm de côté avec un pas d'échantillonnage de 0,120 mm.

5.3.1.2 Problème de la représentativité des mesures

À ce jour, la mesure des profils des revêtements de chaussée n'a jamais fait l'objet d'une étude métrologique rigoureuse. Dans le paragraphe précédent, les paramètres de mesure sont fixés arbitrairement et par conséquent ils sont peut être mal adaptés pour donner une image fidèle de la macrotexture des surfaces routières. Dans l'hypothèse où ils ont été correctement choisis, se pose alors le problème de la représentativité de la mesure : la taille de la surface mesurée est-t-elle suffisamment grande?

Une idée de la qualité de cette représentativité est donnée par les histogrammes des hauteurs de la figure 5.5. Ces derniers ont été obtenus pour deux types de revêtements : un enrobé «ouvert» et un enduit superficiel qui présentent des courbes granulométriques différentes (pour l'enrobé 6/10 mm et pour l'enduit 4/6 - 10/14 mm). Pour chaque revêtement, deux échantillons ont été prélevés simultanément, dans les mêmes conditions et sur le même chantier à quelques mètres l'un de l'autre.

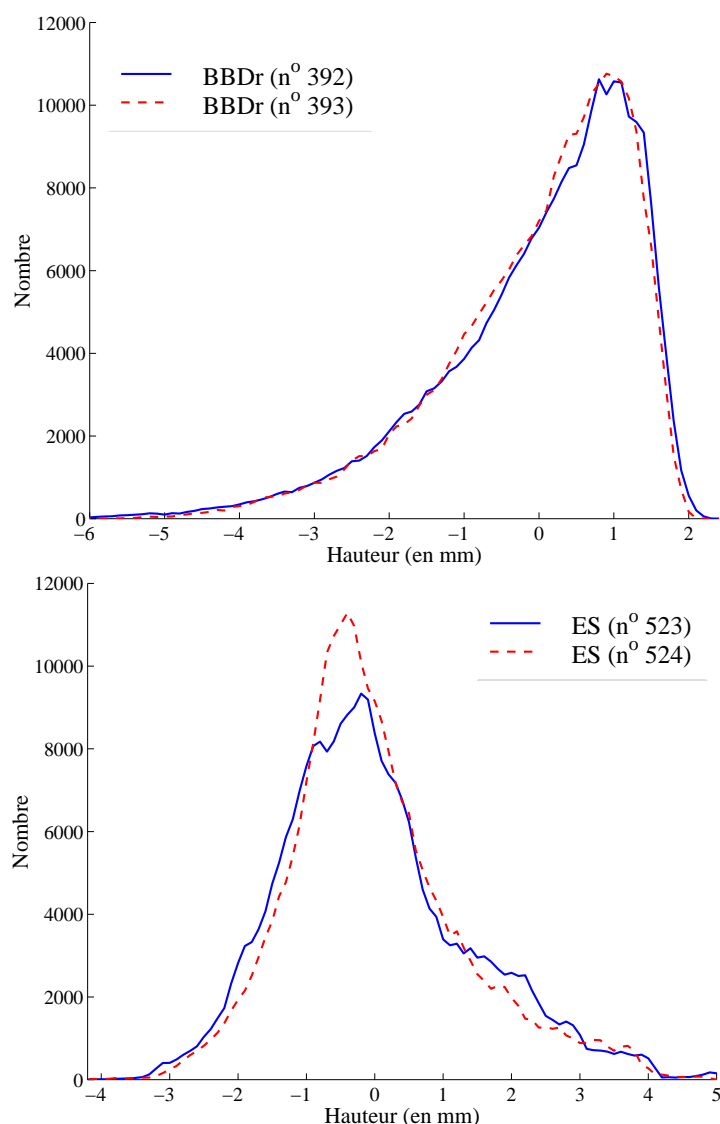


Figure 5.5 Comparaison des histogrammes pour deux échantillons de même type.

Ces histogrammes montrent que pour la surface constituée de la classe granulaire 6/10, ici le BBDr, les deux échantillons ont des distributions des hauteurs très voisines. En revanche, la présence de la classe granulaire 10/14 dans la composition de l'enduit superficiel fait apparaître des écarts importants entre les deux histogrammes, tout en conservant leur forme. La différence entre ces deux histogrammes s'explique par la présence d'un nombre plus important de granulats de la classe 10/14 au niveau de l'un des échantillons. Le fait d'accroître l'aire de la surface mesurée permettrait d'améliorer la représentativité du relevé.

Les résultats précédents laissent donc penser que l'aire de la surface mesurée, 123x123 mm, est proche de l'aire critique minimum qui doit être utilisée. Toutefois, il faut faire attention à la taille de la classe granulaire la plus grande. La classe 10/14 de l'enduit superficiel semble être la valeur maximale acceptable pour une surface mesurée de 123 mm de côté. Si les granulats possèdent une granularité plus importante, la dimension de la surface mesurée devra être augmentée.

5.3.2 Paramètres caractéristiques des surfaces

Caractériser une surface rugueuse par des paramètres statistiques est un problème difficile. Il existe de très nombreuses méthodes qui sont généralement adaptées à la particularité de la surface qui doit être mise en avant (mécanisme de sa fabrication, topographie de sa géométrie, comportement vis-à-vis de son utilisation). En outre, il faut garder à l'esprit que les valeurs des paramètres dépendent très souvent de l'échelle de la mesure (seule l'analyse fractale fait exception à cette règle) et que leurs valeurs sont évidemment liées à la topologie de la surface, mais aussi à des conditions extérieures comme le filtrage, le choix du pas d'échantillonnage et l'aire totale mesurée.

Dans les paragraphes suivant, une analyse sommaire des profils est présentée. Les propriétés étudiées sont :

- les propriétés d'amplitude (§ 5.3.2.1),
- les histogrammes des hauteurs (§ 5.3.2.2),
- les propriétés spatiales (§ 5.3.2.3).

Une analyse plus détaillée, qui passe en revue toutes les techniques existantes, n'a pas sa place dans cette rédaction. La raison principale est que le nombre limité d'échantillons mesurés ne permet pas de trancher en faveur d'un ou plusieurs paramètres pertinents. Ici, l'objectif est surtout de présenter les mesures des profils et de donner une idée des valeurs prises par les paramètres statistiques de base.

5.3.2.1 Paramètres d'amplitude des surfaces

Les profils mesurés présentent des aspects très différents et il semble donc *a priori* facile de pouvoir les caractériser par des paramètres statistiques simples. Les deux paramètres les

plus courants sont la moyenne arithmétique S_a , ou moyenne des écarts absolus, et l'écart-type des hauteurs S_q définis par :

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z(x_i, y_j)|$$

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z^2(x_i, y_j)}$$

Les valeurs de ces deux paramètres sont insensibles au pas d'échantillonnage, mais pas à l'aire totale de la surface mesurée. En outre, il faut remarquer que S_q n'est pas l'écart-type de S_a .

Pour tous les profils, les valeurs de ces deux paramètres sont données dans le tableau 5.3. À l'exception du BBM et du BBSG, et dans une moindre mesure du BBTM, ces valeurs sont pratiquement toutes identiques : S_a est voisin de 1 mm avec une variation maximum de l'ordre de 10% et S_q vaut 1,2 mm avec une variation maximum de 13%. En regardant les images de ces surfaces (cf. figure 5.1) et les coupes présentées avec la figure 5.6, il apparaît clairement que même si les paramètres S_a et S_q ont des valeurs similaires pour deux surfaces données, la texture de ces surfaces peut être très différente. Cette impression est confirmée par l'analyse de l'étendue des mesures. Elles varient beaucoup d'un échantillon à l'autre, mais il arrive aussi qu'elles soient identiques pour deux échantillons de deux revêtements de type différent (par exemple, pour les échantillons n° 392 d'un BBDr, n° 464 d'un BBTM et n° 523 de l'ES).

	S_a (en mm)	S_q (en mm)	étendue (en mm)	min / max (en mm)	S_{dr} (en %)
BBDr 385	0,98	1,22	7,88	-5,89 / 1,99	147
BBDr 387	0,91	1,13	8,47	-6,59 / 1,88	139
BBDr 392	1,05	1,33	9,88	-6,85 / 3,03	155
BBDr 393	0,99	1,24	8,64	-6,04 / 2,60	147
BBTM 464	0,82	1,05	9,79	-5,93 / 3,87	137
BBM 492	0,32	0,44	4,96	-3,99 / 0,97	110
BBSG 496	0,36	0,50	4,93	-3,69 / 1,25	112
ES 523	1,08	1,39	9,20	-4,12 / 5,08	129
ES 524	0,98	1,29	10,55	-5,66 / 4,89	131

Tableau 5.3 : Paramètres statistiques des profils mesurés.

Pour les revêtements «fermés» que sont le BBM et le BBSG, S_a et S_q prennent des valeurs plus petites respectivement égales à 0,34 et 0,47. Enfin, le BBTM donne des valeurs

intermédiaires. En conclusion, les paramètres S_a et S_q permettent de séparer les revêtements très «fermés» (le BBM et le BBSG) des autres surfaces. Mais, pour pouvoir caractériser et différencier correctement les autres types de revêtements, S_a et S_q doivent absolument être complétés par d'autres paramètres.

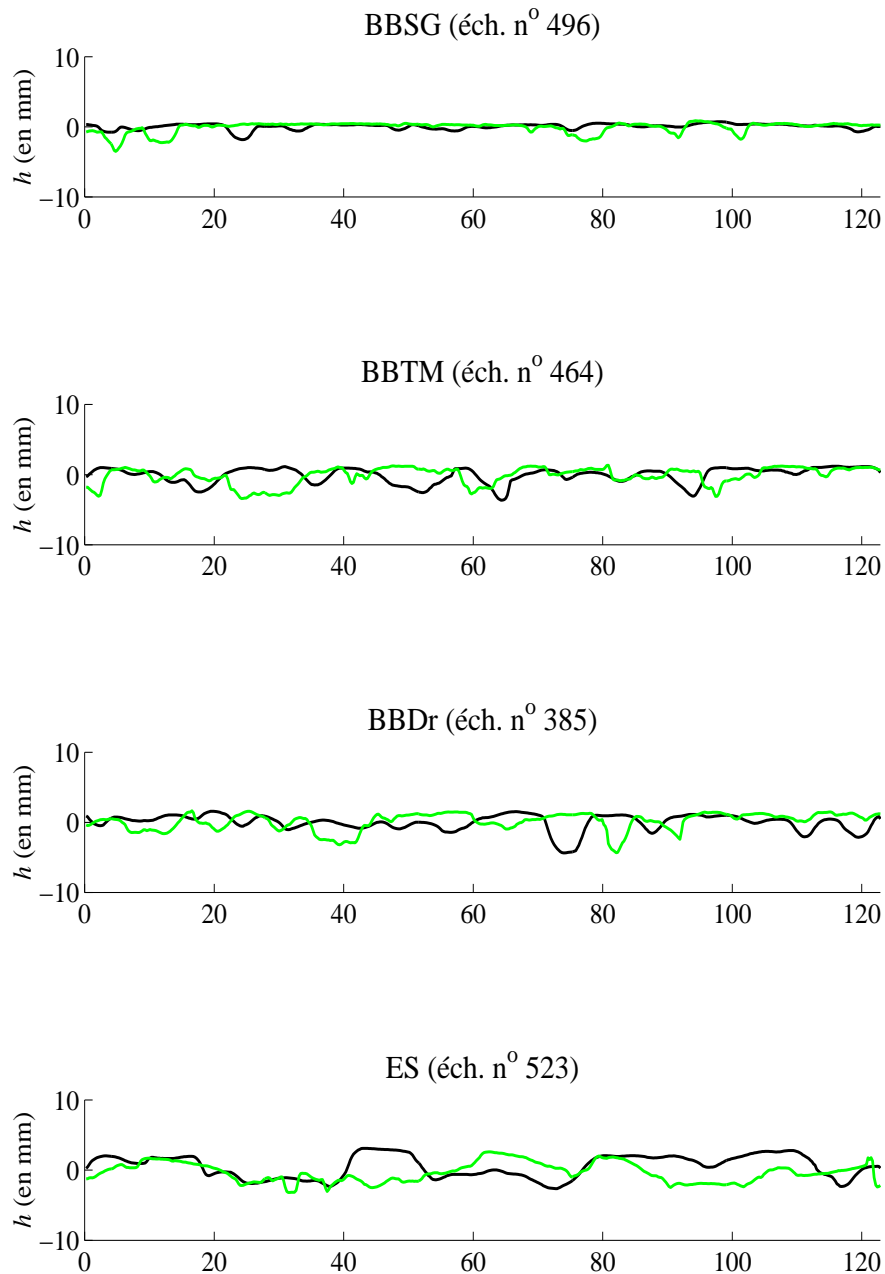


Figure 5.6 Coupes de quelques profils de revêtements de chaussée.

Pour décrire l'aspect des profils, un paramètre intéressant semble être le paramètre S_{dr} , qui caractérise la surface développée et qui est défini comme le rapport de l'aire de la surface mesurée par l'aire de la projection de cette surface sur le plan Oxy . C'est un paramètre hybride dans le sens où il mélange les notions d'amplitude et d'aire. Si le pas d'échantillonnage est

fixe, une grande valeur de S_{dr} signifie que la surface présente soit une grande amplitude des hauteurs soit de nombreux trous peu profonds.

Le calcul de l'aire d'une facette, repérée par le couple d'indice (i, j) et définie par quatre points, est effectué en décomposant cette facette en deux ensembles de deux triangles (cf. §3.2.4.1 section a). Cette aire, notée A_{ij} , est alors la moyenne des deux aires ainsi obtenues et elle est donnée par :

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ \left(\sqrt{\Delta x^2 + (z(x_i, y_j) - z(x_{i+1}, y_j))^2} + \sqrt{\Delta x^2 + (z(x_i, y_{j+1}) - z(x_{i+1}, y_{j+1}))^2} \right) \times \right. \\ \left. \left(\sqrt{\Delta y^2 + (z(x_i, y_j) - z(x_i, y_{j+1}))^2} + \sqrt{\Delta y^2 + (z(x_{i+1}, y_{j+1}) - z(x_{i+1}, y_j))^2} \right) \right\}$$

Le paramètre S_{dr} est proportionnel à la somme des aires A_{ij} de toutes les facettes, d'où :

$$S_{dr} = 100 \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} A_{ij}}{(M-1)(N-1)\Delta x \Delta y} \%$$

Le comportement des valeurs de S_{dr} données dans le tableau 5.3 est plus varié que celui des paramètres précédents. À nouveau, le BBM et le BBSG se démarquent des autres revêtements par une surface développée de l'ordre de 110%. Ce résultat concorde avec l'aspect visuel de cette surface et les valeurs de S_a et S_q : ce sont des revêtements très « fermés » avec des trous peu profonds (fig. 5.6).

D'une manière générale, la valeur de S_{dr} est en corrélation avec l'aspect des revêtements : plus cette valeur est grande, plus la surface apparaît rugueuse. En effet, l'ES et le BBTM ont des surfaces développées de l'ordre de 120%, alors que pour les BBDr, elles sont d'environ 150%. Il est intéressant de remarquer que l'écart entre les surfaces développées des deux échantillons de l'ES n'est que de 2%, alors que la représentativité de ces profils n'est pas très bonne. En revanche, cet écart est de 5% pour les deux BBDr dont les profils sont *a priori* plus représentatifs (§5.3.1.2).

Dans l'ensemble, il apparaît donc que le paramètre S_{dr} permet de distinguer les formules de revêtement en quatre groupes : l'ES, le BBTM, les BBDr et un groupe formé du BBM et du BBSG. Mais, il faudrait beaucoup plus d'échantillons pour donner des fourchettes de valeurs de S_{dr} pour chacun de ces types de revêtement.

5.3.2.2 Analyse de la distribution des hauteurs

Dans un premier temps, les histogrammes des hauteurs des différents revêtements mesurés ont été tracés (fig. 5.7). Pour calculer ces histogrammes, les mêmes conditions sont utilisées et en particulier la largeur des classes est fixée à 0,1 mm. Ainsi, une comparaison directe entre ces histogrammes peut être réalisée.

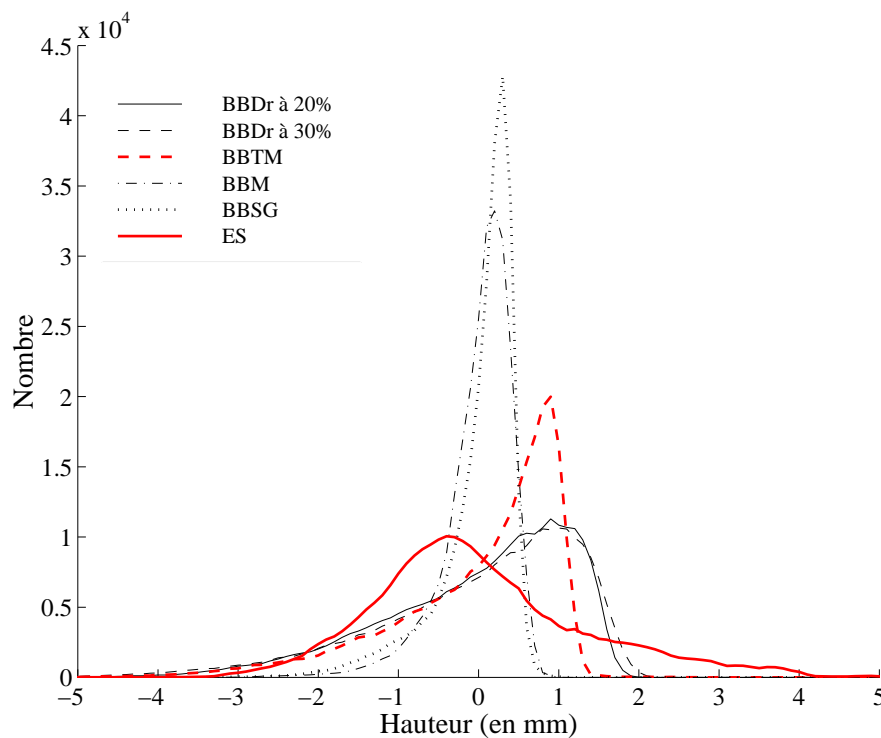


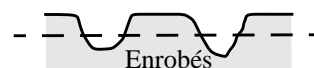
Figure 5.7 Histogrammes des hauteurs des principaux types de revêtements présents sur le territoire français.

Les profils utilisés sont ceux des surfaces redressées. L'utilisation comme plan de référence du plan moyen au sens des moindres carrés joue sur la position de ces histogrammes, mais pas sur leur forme.

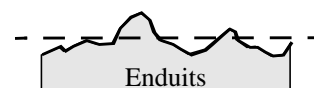
Contrairement aux paramètres S_a et S_q , les histogrammes de la figure 5.7 montrent qu'il existe des différences importantes entre les types de revêtement. Les revêtements à l'aspect très « fermé », c'est-à-dire le BBM et le BBSG, ont une distribution des hauteurs dissymétrique qui se caractérise par un pic très important. Le BBTM et les BBDr présentent également cette dissymétrie mais, comme ils sont d'aspect « ouvert », leur histogrammes sont plus étendus et les pics moins importants. Dans tous les cas, ces histogrammes ressemblent à une loi de distribution log-normale. Le profil de l'enduit superficiel (ES) donne un comportement totalement différent. Sa distribution des hauteurs est presque symétrique et elle s'approche d'une loi de distribution normale.

Pour tous les revêtements, le zéro des hauteurs est difficile à interpréter, car il ne correspond pas à une réalité physique facilement identifiable (§ 5.2.3). Les médianes données dans le tableau 5.4 révèlent encore plus franchement ce problème. En effet, pour l'enduit superficiel, le zéro est plus grand que la médiane tandis que pour les enrobés, le zéro correspond à moins de 50% des hauteurs. L'ensemble de ces résultats se comprend aisément en considérant l'aspect des textures de ces revêtements qui est liée à leur technique de fabrication (§ 5.1.1).

Pour l'ensemble des enrobés, le compactage a pour conséquence d'aplanir la couche de roulement. Mais, la présence des granulats, en particulier des granularité les plus grosses, crée des «vides» dans le revêtement. Ces «vides» sont alors à l'origine des dépressions qui apparaissent à la surface, qui garde néanmoins un aspect plutôt «lisse». L'ensemble des trous a pour effet de tirer vers le bas le «plan des moindres carrés». Ceci est d'autant plus important que le revêtement est «ouvert» (cas des BBDr).



Pour l'enduit superficiel, les granulats sont déposés sur un film de liant. Le revêtement se caractérise alors par des pics qui sont plus ou moins hauts. Cependant, la classe granulaire la plus petite (ici 4/6 mm) forme une couche de base assez uniforme sur laquelle les plus gros granulats (ici 10/14 mm) vont ressortir. À cause de ces derniers, le «plan moyen au sens des moindres carrés» est cette fois-ci tiré vers le haut.



	Inter-quartile (en mm)	Médiane (en mm)	Q_3 (en mm)
BBDr 385	1,68	0,28	0,96
BBDr 387	1,57	0,26	0,88
BBDr 392	1,71	0,31	1,00
BBDr 393	1,64	0,29	0,95
BBTM 464	1,30	0,34	0,78
BBM 492	0,47	0,09	0,29
BBSG 496	0,46	0,15	0,32
ES 523	1,70	-0,18	0,75
ES 524	1,46	-0,20	0,65

Tableau 5.4 : Paramètres descriptifs des distributions des hauteurs des profils mesurés.

Il existe plusieurs solutions pour définir un nouveau plan de référence. Plusieurs essais ont révélé que la méthode la plus simple consiste à décaler le «plan des moindres carrés» d'une hauteur h_0 égale à un des quartiles³ de la distribution du profil. Les remarques précédentes sur les formes des profils ont alors conduit aux choix suivants : pour les enrobés, h_0 est le quartile Q_3 et pour les enduits, h_0 est la médiane. Ces différentes valeurs sont données dans le tableau 5.4, et les nouveaux histogrammes sont tracés sur la figure 5.8. Il apparaît maintenant

3. Les quartiles sont définis à partir de la fonction de répartition F : $F(Q_1) = 0,25$, $F(Q_2) = 0,50$ et $F(Q_3) = 0,75$. Q_2 est également la médiane.

que les maxima des distributions de tous les revêtements sont centrés sur le zéro du nouveau plan de référence.

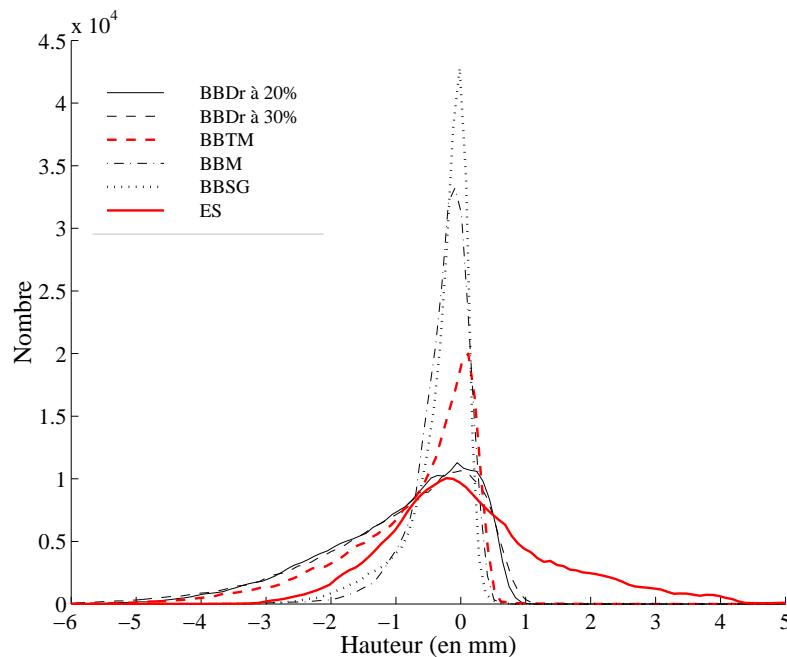


Figure 5.8 Histogrammes des hauteurs des profils mesurés après décalage du plan de référence.

L'espace inter-quartile (tableau 5.4) mesure la dispersion des hauteurs d'une manière plus robuste que l'étendue (tableau 5.3). Il est défini comme l'intervalle compris entre les quartiles Q_1 et Q_3 , c'est-à-dire l'intervalle entre les hauteurs correspondants à moins de 25% et à plus de 75% des données. Toutefois, il ne permet pas de différencier les revêtements puisqu'il donne des valeurs similaires pour des types de revêtements totalement différents.

Dans cette seconde partie, les histogrammes sont étudiés séparément. L'objectif est maintenant de déterminer qu'elle est la loi de distribution connue qui ressemble le plus à ces histogrammes et de calculer les paramètres caractéristiques de cette loi : sa moyenne μ et son écart-type σ .

Comme le montrent les courbes de la figure 5.9, les distributions des hauteurs des enrobés (BBDr, BBTM, BBM et BBSG) sont semblables à une loi de distribution log-normale. Pour obtenir ces résultats, une transformation a été effectuée sur les hauteurs de telle sorte que le plan de référence est décalé sur la valeur maximale des profils. Ainsi, ce sont les valeurs absolues des profondeurs qui sont utilisées et qui suivent une loi de distribution log-normale.

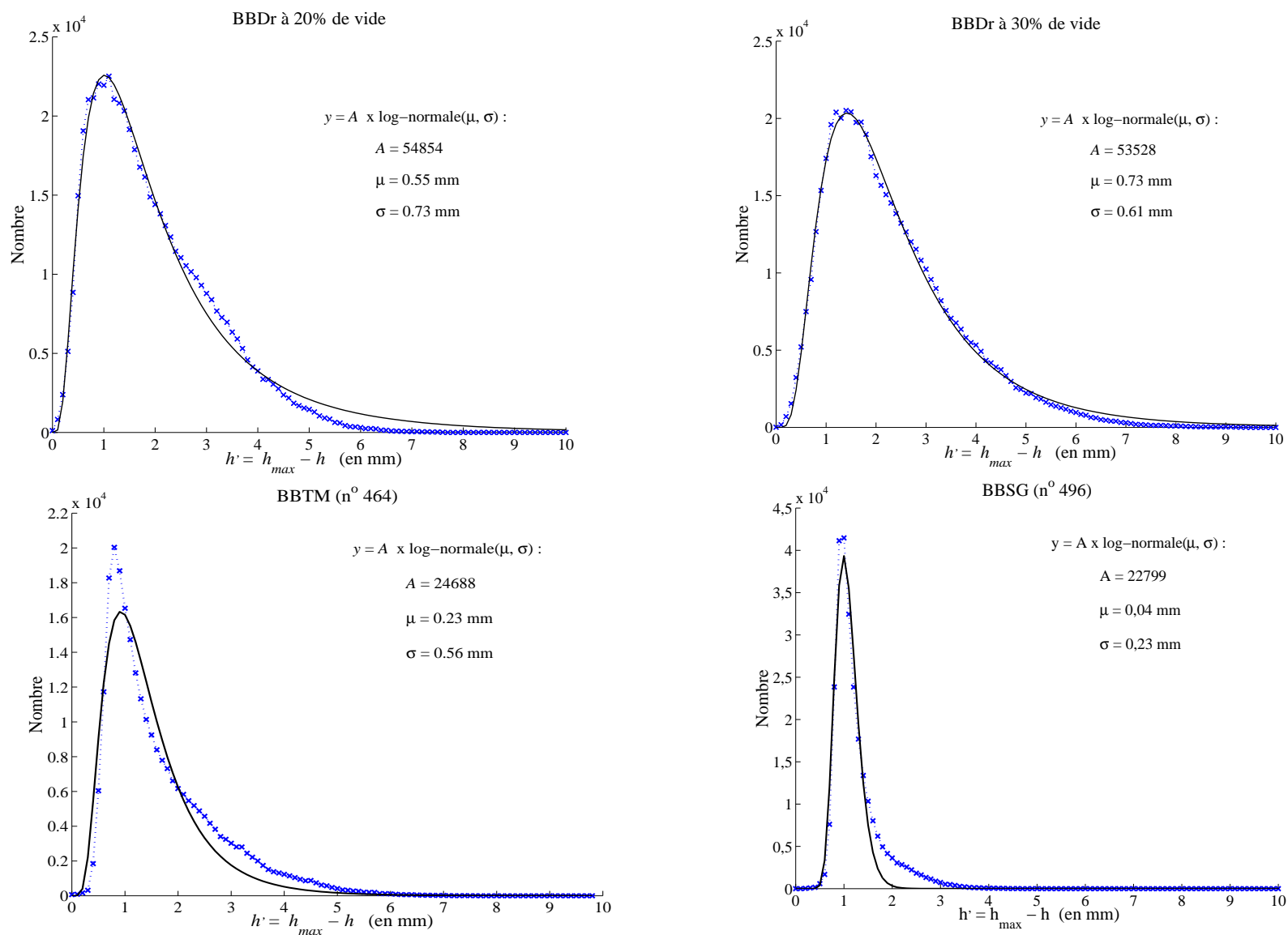


Figure 5.9 Recherche des paramètres des lois de distribution du type log-normal.

La moyenne μ et l'écart-type σ de ces lois de distribution ont ensuite été recherchés en utilisant la méthode des moindres carrés. Mais, étant donné que la loi log-normale a une croissance très rapide pour les premières classes (h' voisin de 0), les valeurs de μ et σ sont très sensibles au contenu de ces classes. Dans certains cas, les premières classes ont été supprimées pour obtenir une meilleur concordance entre les histogrammes et la loi log-normale. Les classes supprimées, qui correspondent aux hauteurs les plus élevées, représentent toujours moins de 1% des données.

Pour les BBDr, la concordance entre les histogrammes⁴ et la loi log-normale est dans l'ensemble très bonne. Il existe ponctuellement des écarts entre les données et le modèle, mais l'allure générale est conservée. En revanche, pour le BBM, BBSG et le BBTM, la loi log-normale ne respecte pas l'allure générale des histogrammes et des écarts importants apparaissent autour du maximum et du pied des histogrammes. D'ailleurs, dans ces situations, les valeurs obtenues pour μ et σ dépendent beaucoup des données utilisées : la suppression plus ou moins arbitraire des premières classes modifient de manière notable les valeurs de ces paramètres.

L'enduit superficiel présente une distribution des hauteurs différente puisqu'il apparaît que son histogramme est la somme de deux lois de distribution normales. Cette observation concorde avec le fait que ce type de revêtement est composé de deux classes granulaires discontinues. Les paramètres de ces deux lois normales ont été recherchés. Le maximum de l'histogramme n'est pas parfaitement centré sur zéro ($\mu_1 = -0,21$ mm), car du fait de la présence des plus gros granulats, la valeur de la médiane utilisée pour définir le plan de référence est légèrement décalée vers les hauteurs positives.

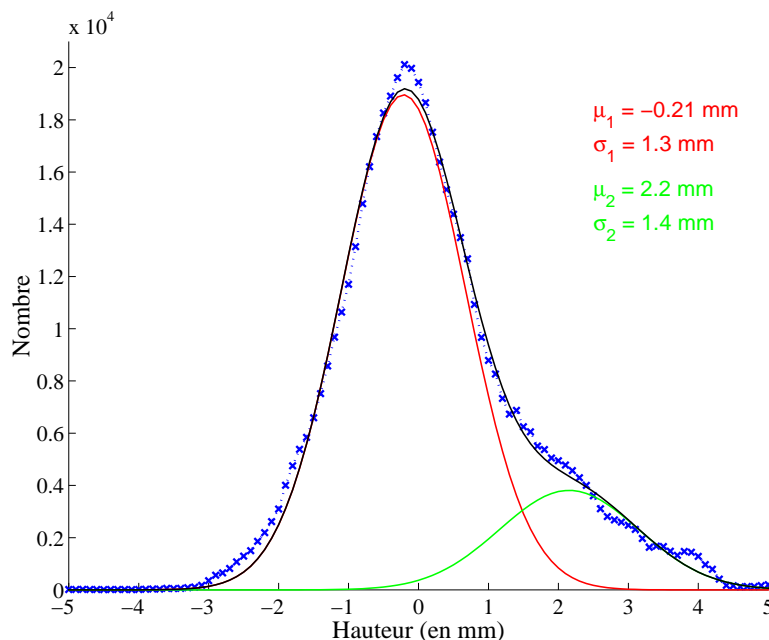


Figure 5.10 Recherche des paramètres des deux lois normales pour l'ES.

4. Pour limiter le problème de la représentativité de la mesure (§ 5.3.1.2), les histogrammes utilisés dans cette étude sont le résultat de la somme des histogrammes des deux échantillons mesurés. C'est donc ici le cas pour le BBDr à 20% de vide (échantillons 385 et 387), celui à 30% de vide (échantillons 392 et 393) et l'enduit superficiel (échantillons 523 et 524).

L'étude des histogrammes des hauteurs des profils se révèle être un bon moyen pour différencier les types de revêtement. La nature de la loi de distribution utilisée et les valeurs des paramètres statistiques de cette loi, c'est-à-dire la moyenne μ et l'écart-type σ , semblent suffisants pour décrire le profil d'un revêtement. Une étude plus approfondie sur un grand nombre d'échantillon permettrait sans doute d'associer à chaque type de revêtement une loi de distribution et une gamme de valeurs pour μ et σ . Par ailleurs, il serait intéressant d'étudier la relation liant ces paramètres statistiques et la formulation des revêtements, en particulier la courbe granulométrique.

Cependant, dans le cas où l'histogramme des hauteurs de la surface ne correspond à aucune loi de distribution classique, cette méthode ne peut plus être appliquée. En effet, les valeurs obtenues pour μ et σ n'ont alors plus aucun sens et elles ne peuvent pas être utilisées pour caractériser la texture du revêtement.

5.3.2.3 Propriétés spatiales des surfaces

Pour décrire complètement une surface aléatoire, la fonction d'autocorrélation joue un rôle important, car elle met en évidence les répétitions de forme qui ont lieu à grande échelle. Toutes les fonctions d'autocorrélation des profils mesurés ont donc été calculées et certaines d'entre elles sont présentées sur la figure 5.11.

Pour chaque surface, les coupes suivant Ox et Oy de la fonction d'autocorrélation normalisée $B(\tau)$ sont tracées. La fonction gaussienne qui s'approche le plus de ces coupes est également déterminée. Ceci permet alors de définir deux longueurs de corrélation : T_x suivant la direction Ox et T_y suivant Oy . Une longueur de corrélation moyenne T_{moy} est calculée en fonction de T_x et T_y et la gaussienne de paramètre T_{moy} est dessinée.

Le choix d'une fonction d'autocorrélation de forme gaussienne est arbitraire. Cependant, les courbes de la figure 5.11 montrent que la gaussienne est une bonne approximation des fonctions d'autocorrélation des différents revêtements.

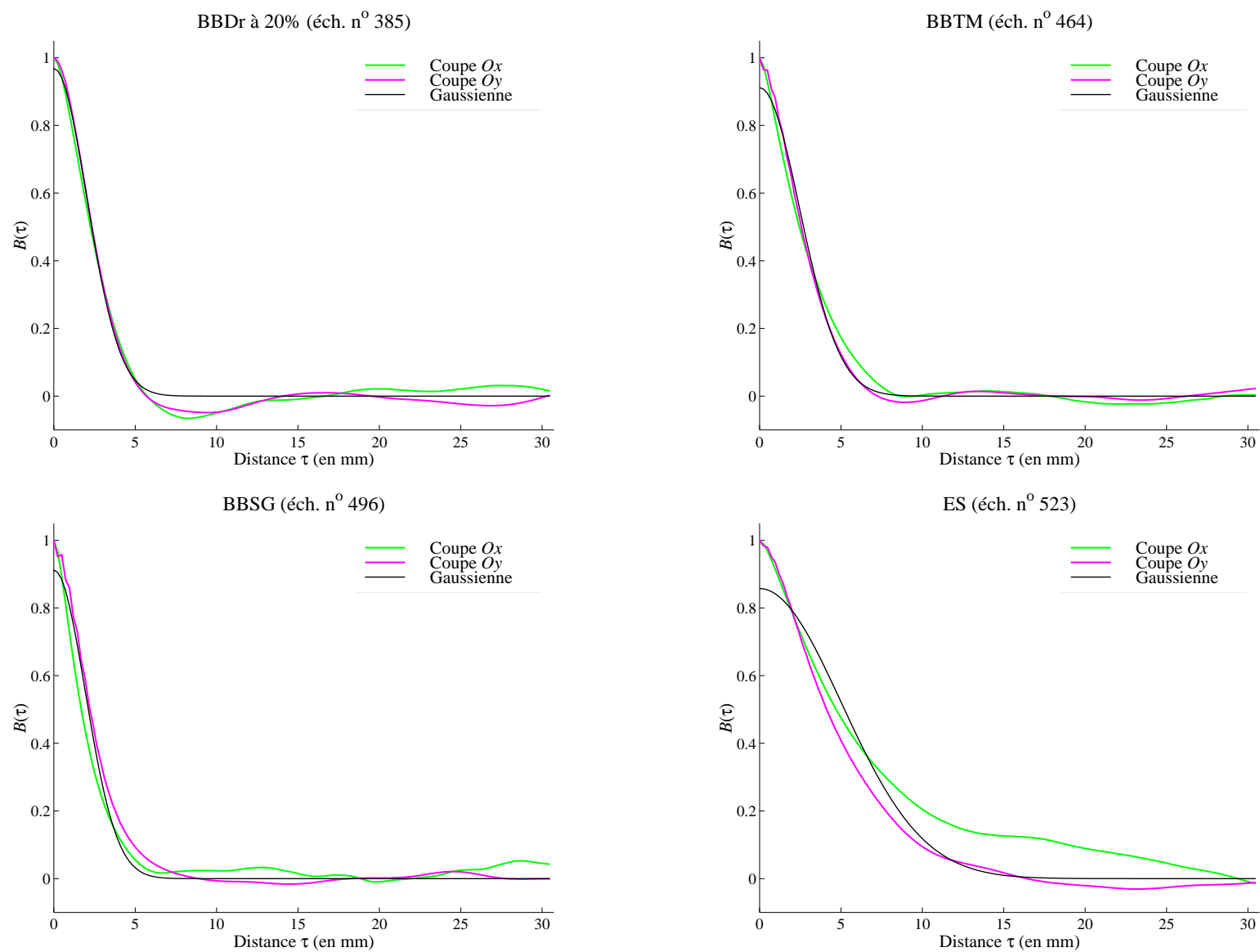


Figure 5.11 Fonctions d'autocorrélation $B(\tau)$ de différents revêtements.

Pour l'ensemble des enrobés, les écarts entre le modèle et les courbes expérimentales sont faibles. Toutefois, comme l'indique le tableau 5.5, cela ne signifie pas que les deux longueurs de corrélation T_x et T_y sont égales (voir par exemple le BBSG). L'enduit superficiel donne des écarts beaucoup plus importants. Avec l'échantillon 523, il semble que ce revêtement se caractérise également par une anisotropie très marquée. Mais encore une fois, il ne faut pas généraliser cette remarque, car cette anisotropie peut avoir pour origine une mauvaise représentativité de la mesure du profil.

	T_{moy} (en mm)	T_x (en mm)	T_y (en mm)	écarts (en %)
BBDr 385	2,87	2,88	2,85	1
BBDr 387	3,15	3,30	3,00	10
BBDr 392	2,93	3,01	2,84	6
BBDr 393	3,17	2,91	3,43	18
BBTM 464	3,49	3,64	3,34	9
BBM 492	3,54	3,57	3,50	2
BBSG 496	2,73	2,50	2,96	18
ES 523	7,10	8,24	5,96	38
ES 524	6,60	6,42	6,78	6

Tableau 5.5 : Longueurs de corrélations des profils mesurés.

5.3.3 Conclusion

La mesure des profils des revêtements de chaussée est primordiale pour étudier le coefficient de luminance de ces surfaces à l'aide du goniophotomètre virtuel. L'utilisation de l'appareil TRIDIM du LCPC-Nantes n'a pas permis à l'heure actuelle d'obtenir des mesures fiables et nombreuses. Dans ces conditions, une étude statistique complète des caractéristiques «géométriques» de ces profils n'a pas pu être réalisée.

Cependant, les paragraphes précédents ont permis de montrer qu'il existe des différences importantes entre les profils des différents types de revêtement. Les paramètres statistiques simples, comme la moyenne arithmétique S_a et l'écart-type des hauteurs S_q , ne mettent pas en avant cette diversité et il faut recourir à l'analyse des histogrammes des hauteurs. Dans le cas où ces histogrammes sont semblables à une loi de distribution classique, les paramètres de cette distribution (la moyenne μ et l'écart-type σ) suffisent pour décrire les variations de hauteurs du profil. Pour décrire complètement la surface et connaître ses variations à plus grande échelle, il faut employer la fonction d'autocorrélation. Il semble que tous les revêtements ont une fonction d'autocorrélation de forme gaussienne et qu'ils se différencient uniquement par leur longueur de corrélation.

Il est tentant de caractériser une surface rugueuse par un paramètre unique. Comme l'a montré l'étude de la surface développée (§ 5.3.2.1), le paramètre S_{dr} pourrait convenir puisqu'il permet de différencier les types de revêtement. Mais, à l'image des «surfaces à profil gaussien» (cf. § 2.3.3.4), un paramètre de rugosité r peut également être défini. Pour les revêtements de chaussée, ce nouveau paramètre, noté r' , serait par exemple le rapport entre l'écart-type des hauteurs S_q (tableau 5.3) et la longueur de corrélation moyenne T_{moy} (tableau 5.5). Cependant, la loi de distribution des hauteurs du profil n'est pas sous-entendue dans la définition de r' . Par rapport à r , il y a donc un lien moins fort entre la valeur de r' et l'aspect du profil de la surface.

La figure 5.12 donne un aperçu des valeurs de S_{dr} en fonction de r ou r' . Encore une fois, du fait du petit nombre d'échantillon, il est difficile de mettre en évidence une corrélation entre ces deux paramètres ou de trancher en faveur de l'un d'eux pour caractériser les revêtements.

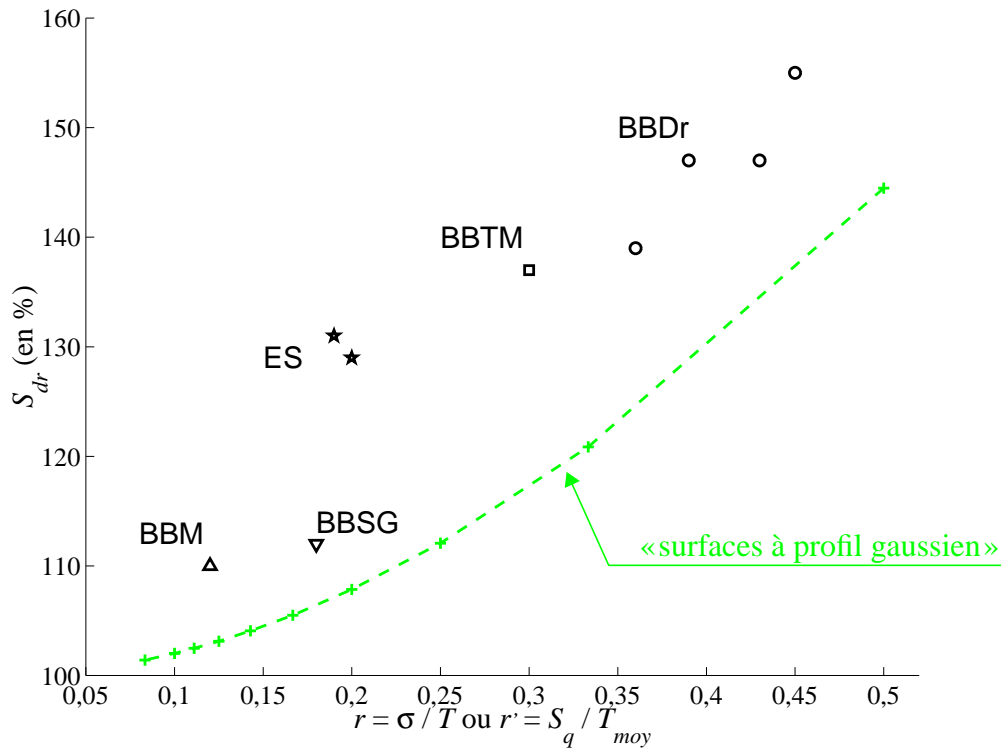


Figure 5.12 Rugosité et surface développée des revêtements de chaussée et des «surfaces à profil gaussien».

L'ensemble des informations fournies par l'histogramme et la fonction d'autocorrélation permet ainsi de décrire complètement le profil d'un revêtement. Comme cela a été réalisé pour les «surfaces à profil gaussien» (cf. annexe A.1), il est alors possible de générer à volonté des surfaces synthétiques qui respectent les mêmes caractéristiques «géométriques». Toutefois, il faut garder à l'esprit que les méthodes utilisées pour créer ces surfaces ne permettent pas de définir des arêtes vives ou un décrochement brutal qui sont souvent liés aux granulats. Ces surfaces apparaîtront donc toujours plus lissées que les surfaces réelles.

5.4 Utilisation des profils mesurés

5.4.1 Étude des réflexions multiples

Comme pour l'étude réalisée sur les surfaces synthétiques (cf. §4.1), les caractéristiques des réflexions simples et d'ordre supérieur sont analysées en fonction de l'angle d'éclairage θ_i , de la texture de la surface, ici le type de revêtement, et des propriétés optiques du matériau.

Il a été préalablement vérifié que les profils des mêmes revêtements donnent des résultats identiques quant à la répartition en nombre des réflexions. Pour ces derniers, c'est-à-dire pour les BBDr à 20% de vide (échantillons 385 et 387), les BBDr à 30% de vide (échantillons 392 et 393) et l'ES (échantillons 523 et 524), une seule courbe est donc tracée dans les différentes figures suivantes.

5.4.1.1 Cas où le matériau est spéculaire

Pour tous les revêtements, les proportions des réflexions simples par rapport au nombre total de rayons réfléchis sont représentées avec la figure 5.13. Ces courbes montrent qu'il existe deux comportements types. En effet, le BBM et le BBSG se caractérisent par un nombre de réflexions simples d'environ 90% identique pour tous les angles d'éclairage θ_i . À l'inverse, les autres revêtements voient le nombre de ces réflexions simples augmenter au fur et à mesure que l'éclairage devient rasant. Mais, finalement, pour θ_i égal à 80° , le nombre de réflexions simples tend vers une limite d'environ 90% commune à tous les revêtements.

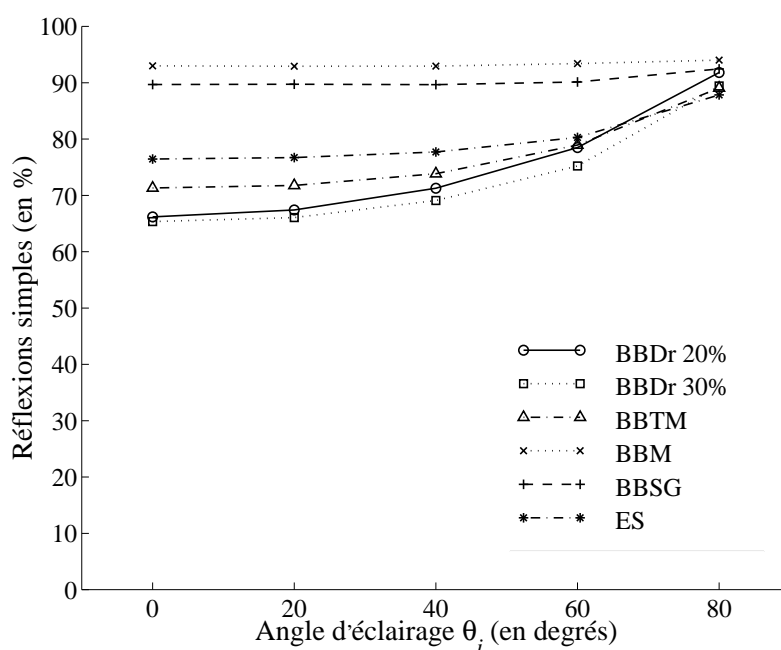


Figure 5.13 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).

Il apparaît également que les comportements des BBDr à 20% et 30% de vide sont semblables, leurs deux courbes étant légèrement translatées l'une par rapport à l'autre.

L'étude des réflexions multiples conduit à des observations semblables à celles faites pour les réflexions simples. À l'exception du BBM et du BBSG, le nombre des réflexions doubles et d'ordre supérieur varie avec θ_i , mais cette fois-ci il diminue pour les angles rasants (fig. 5.14). Par ailleurs, quel que soit l'angle d'éclairage, les réflexions multiples se décomposent en 2/3 de réflexions doubles et 1/3 de réflexions d'ordre supérieur.

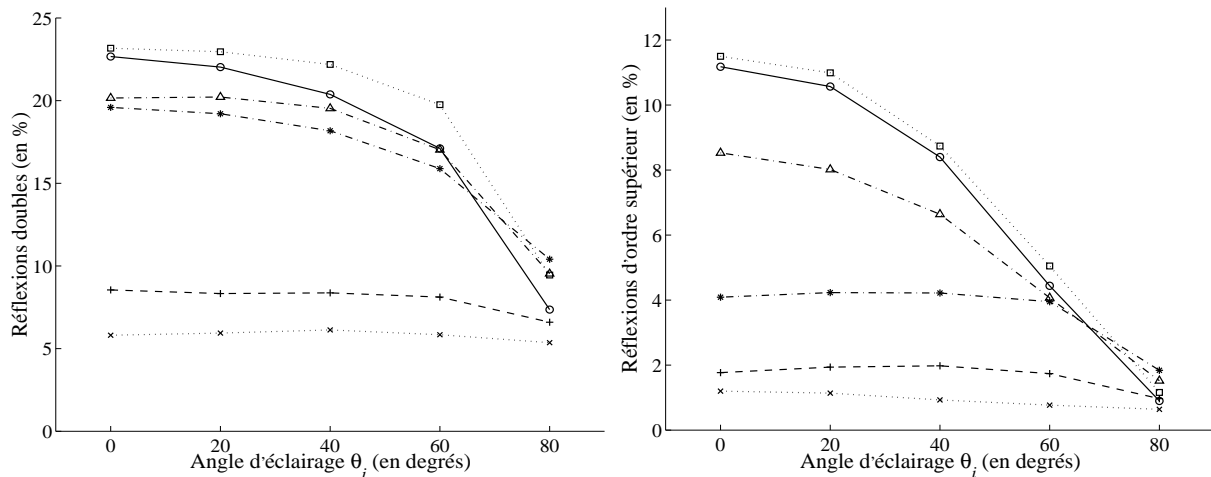


Figure 5.14 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau spéculaire).

En identifiant les revêtements de chaussée à des «surfaces à profil gaussien», les résultats du paragraphe 4.1.1 peuvent être utilisés. Or, pour ce type de surfaces, il a été démontré que les réflexions multiples sont importantes d'un point de vue énergétique uniquement dans certaines conditions. En reprenant le cas de la surface de rugosité $r = 0,5$ (pour laquelle le nombre de réflexions d'ordre supérieur est inférieur à 10%, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celui obtenu avec les revêtements de chaussée), il faut que la proportion de réflexions doubles soit plus grande que 45% pour $\theta_i = 0^\circ$, 40% pour $\theta_i = 20^\circ$, 30% pour $\theta_i = 40^\circ$ et 15% pour $\theta_i = 60^\circ$. Comme le montre la figure 5.14, ces pourcentages ne sont atteints pour aucun des revêtements de chaussée.

Dans les conditions utilisées ici, c'est-à-dire pour un matériau purement spéculaire, il apparaît donc que les contributions des réflexions multiples au coefficient de luminance total des revêtements de chaussée sont toujours négligeables.

5.4.1.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant

À nouveau, les proportions des réflexions simples sont tout d'abord étudiées. La figure 5.15 montre que ces proportions sont indépendantes de l'angle d'éclairage θ_i . Les BBM et BBSG se démarquent encore une fois des autres revêtements, car le nombre de réflexions simples qu'il génère est plus important (85% contre 70%).

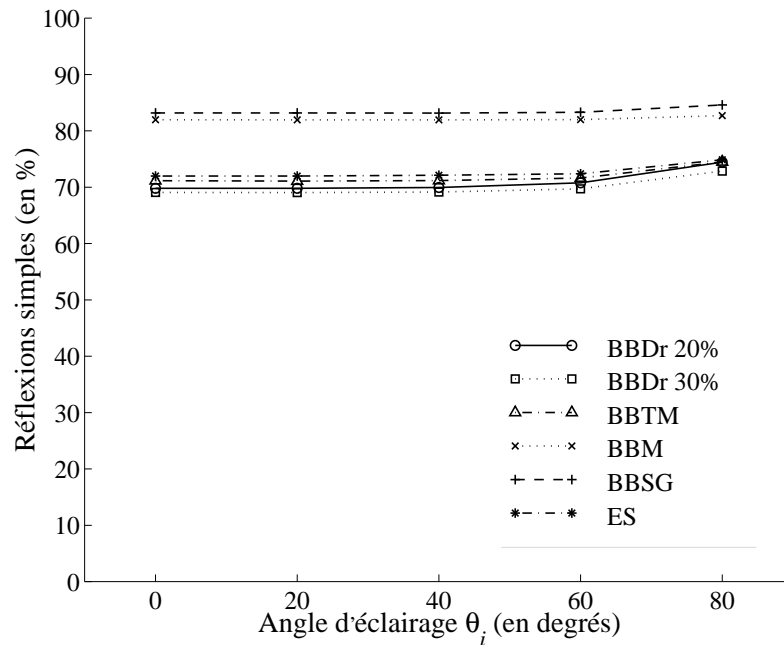


Figure 5.15 Évolution du nombre de réflexions simples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).

Les réflexions multiples se décomposent équitablement entre les réflexions doubles et les réflexions d'ordre supérieur (sauf pour le BBM et le BBSG pour lequel les rapports 2/3 - 1/3 sont retrouvés). Les variations de ces réflexions avec l'angle d'éclairage θ_i sont également peu importantes (fig. 5.16).

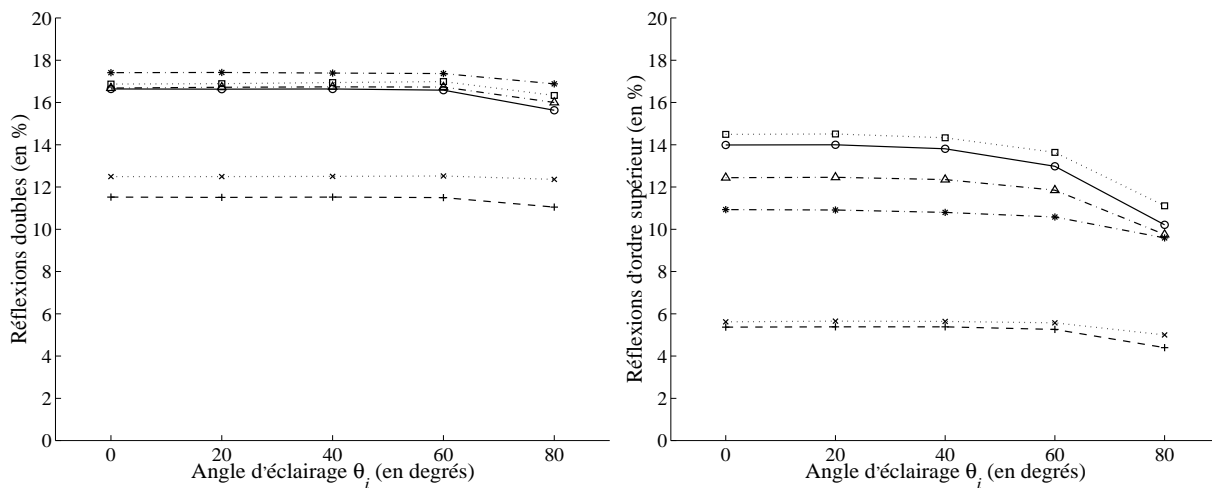


Figure 5.16 Évolution du nombre de réflexions multiples en fonction du type de revêtement et de l'angle d'éclairage θ_i (matériau parfaitement diffusant).

En comparant les courbes précédentes avec celles obtenues pour les surfaces synthétiques (*cf.* les figures 4.5 et 4.6), une grande similitude de comportement est retrouvée. Partant de cette observation, le raisonnement suivi pour les surfaces synthétiques est donc repris ici. Comme pour le cas où le matériau est purement spéculaire, il apparaît que les contributions des réflexions multiples sont négligeables par rapport au coefficient de luminance dû aux seules réflexions simples. Par ailleurs, ces résultats sont obtenus pour un matériau non absorbant. Si l'absorption du matériau est grande, alors les contributions des réflexions multiples deviennent encore moins importantes (*cf.* la remarque du § 4.1.2).

5.4.1.3 Conclusion

Les paragraphes 5.4.1.1 et 5.4.1.2 ont mis clairement en évidence que les réflexions multiples sont toujours négligeables en énergie même si dans certaines conditions elles représentent 30% des rayons réfléchis par le revêtement. Autrement dit, le coefficient de luminance d'un revêtement de chaussée est essentiellement le résultat des réflexions simples sur la surface. Il n'y a aucune restriction à cette règle puisqu'elle est valable pour toutes les textures de revêtement, toutes les propriétés optiques et pour tous les angles d'éclairage θ_i .

Ce résultat est intéressant, car il signifie qu'il suffit d'étudier uniquement le comportement des réflexions simples. L'élaboration d'un modèle théorique appliqué aux revêtements de chaussée devient alors beaucoup plus simple. Ce travail n'est pas envisagé ici, car pour le mener à bien il est nécessaire de connaître complètement les propriétés des profils des revêtements. Or, ceci n'a pas pu être réalisé (§ 5.3.3).

Cependant, l'étude des effets de «masquage / ombrage» de ces revêtements apporte déjà de nouvelles informations utiles au développement d'un modèle. Elle est abordée dans le paragraphe suivant.

5.4.2 Étude des effets de «masquage / ombrage»

Dans cette partie, les effets de «masquage / ombrage» sont étudiés en utilisant l'algorithme développé puis validé aux paragraphes 4.2.1 et 4.2.2.

5.4.2.1 Le coefficient de masquage S

La figure 5.17 présente le coefficient de masquage S calculé pour chacun des types de revêtement (dans le cas où plusieurs échantillons existent, c'est la moyenne des coefficients S qui est utilisée). L'influence de la texture des surfaces se manifeste clairement sur ces courbes.

Pour le BBSG et le BBM, c'est-à-dire pour les enrobés «fermés» qui paraissent les plus «lisses», l'angle θ au-dessus duquel S est différent de 1 est de 40° , alors qu'il n'est que de 20° pour les autres revêtements. La lente décroissance de S , observée pour les angles θ plus grands, s'accélère de plus en plus à mesure que θ devient rasant. Par exemple, pour le BBSG et pour $\theta = 70^\circ$, seulement 10% de la surface sont masqués, alors que pour $\theta = 80^\circ$ ce chiffre passe à 25%. Pour les autres enrobés et l'enduit, qui sont plus rugueux, la décroissance de S est encore plus importante et les chiffres de 10% et 25% de surface cachée sont obtenus pour des angles respectifs d'environ 50° et 65° .

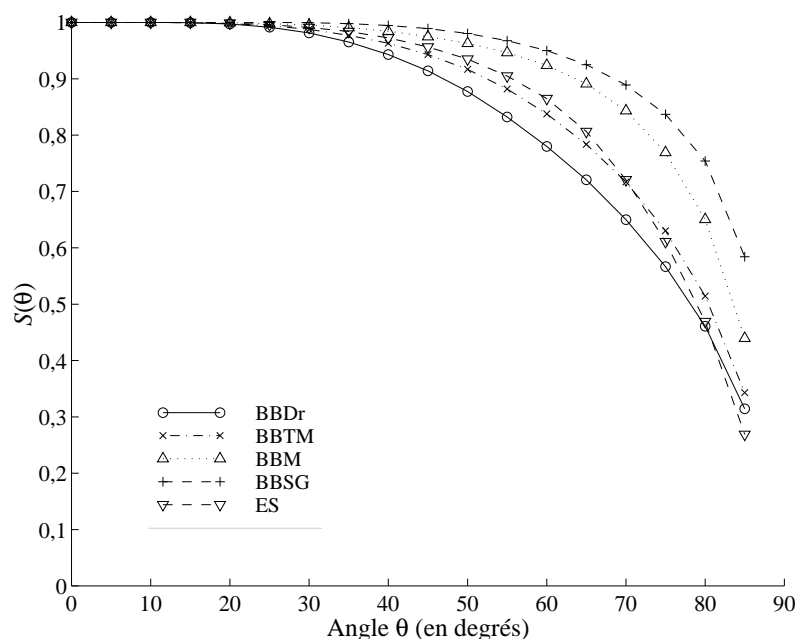


Figure 5.17 Coefficient de masquage S en fonction du type de revêtement.

Les valeurs de S précédentes constituent un cas particulier du coefficient de «masquage / ombrage» C pris pour $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_r = 0^\circ$ et $\theta = \theta_r$ variable. Mais, d'autres directions d'observation ϕ_r peuvent être utilisées pour déterminer S . Si la surface est parfaitement isotrope, les valeurs de S sont identiques. Inversement, des écarts sur les valeurs de S s'expliquent par une anisotropie de la surface.

La figure 5.18 donne le coefficient de masquage S de trois types de revêtement calculé pour ϕ_r égal à 0° , 90° et 180° . Même si cela n'a pas été clairement mis en évidence par les fonctions d'autocorrélation (§5.3.2.3), il apparaît maintenant que les revêtements de chaussée ont une texture anisotrope. Des écarts importants existent entre les valeurs de S calculées dans le plan d'éclairage⁵ ($\phi_r = 0^\circ$ ou 180°) et dans un plan perpendiculaire ($\phi_r = 90^\circ$).

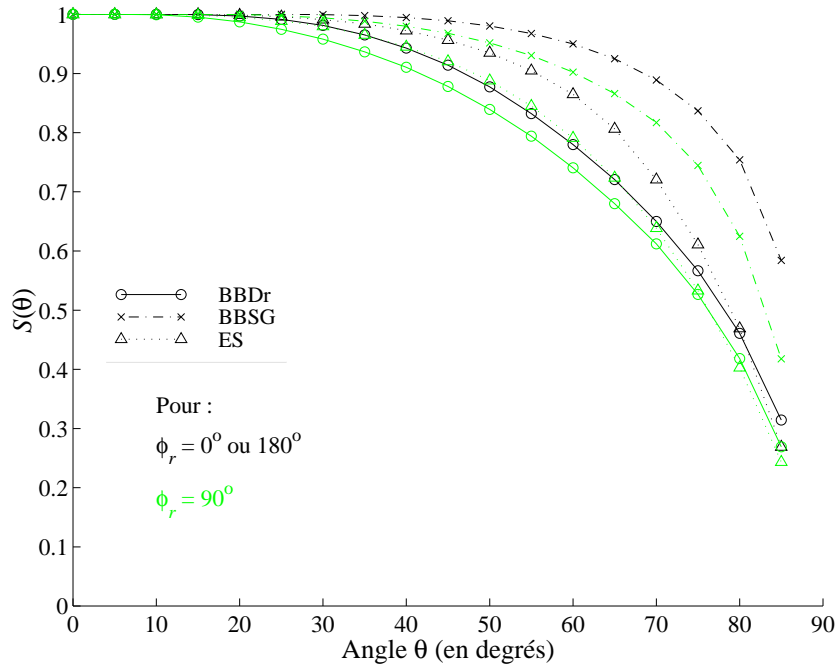
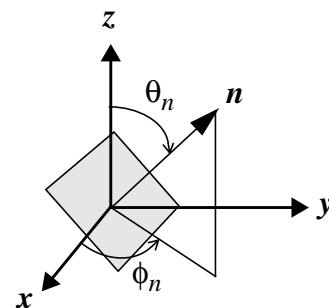


Figure 5.18 Valeurs du coefficient de masquage S suivant la direction d'observation ϕ_r considérée.

Pour tenter d'expliquer ces résultats, il faut prendre en compte la technique de fabrication des revêtements de chaussée (§5.1.1). Le compactage des enrobés ou le répandage des enduits se fait suivant un axe unique, celui de la route, parallèle au plan d'éclairage. *A priori* ceci doit avoir une influence sur l'orientation moyenne des granulats, c'est-à-dire sur l'orientation d'une partie des facettes qui composent les profils.

Les normales de ces facettes sont repérées par les deux angles θ_n et ϕ_n . En découpant chaque facette en un ensemble de deux triangles choisis aléatoirement (cf. §3.2.4.1, section a), deux normales sont alors définies.

La distribution de ces normales a été déterminée pour plusieurs revêtements. Pour permettre une comparaison avec une surface connue isotrope, cette distribution des normales a également été calculée pour une «surface



5. Les courbes pour $\phi_r = 180^\circ$ ne sont pas tracées car elles sont confondues avec celles obtenues pour $\phi_r = 0^\circ$.

à profil gaussien» ($r = 0,1$). Celle-ci se caractérise par une répartition des normales à symétrie de révolution autour de l'axe Oz .

Avec la représentation choisie pour la figure 5.19, cette isotropie se traduit par une tache circulaire. Dans ces conditions, l'anisotropie du BBSG apparaît de manière évidente. Contrairement à la «surface à profil gaussien», il existe une forte dissymétrie entre le plan d'éclairage (axe horizontal) et le plan défini par les directions $\phi_n = 90^\circ$ et $\phi_n = 270^\circ$ (axe vertical). En revanche, pour le BBDr et l'ES, cette dissymétrie est plus difficile à voir.

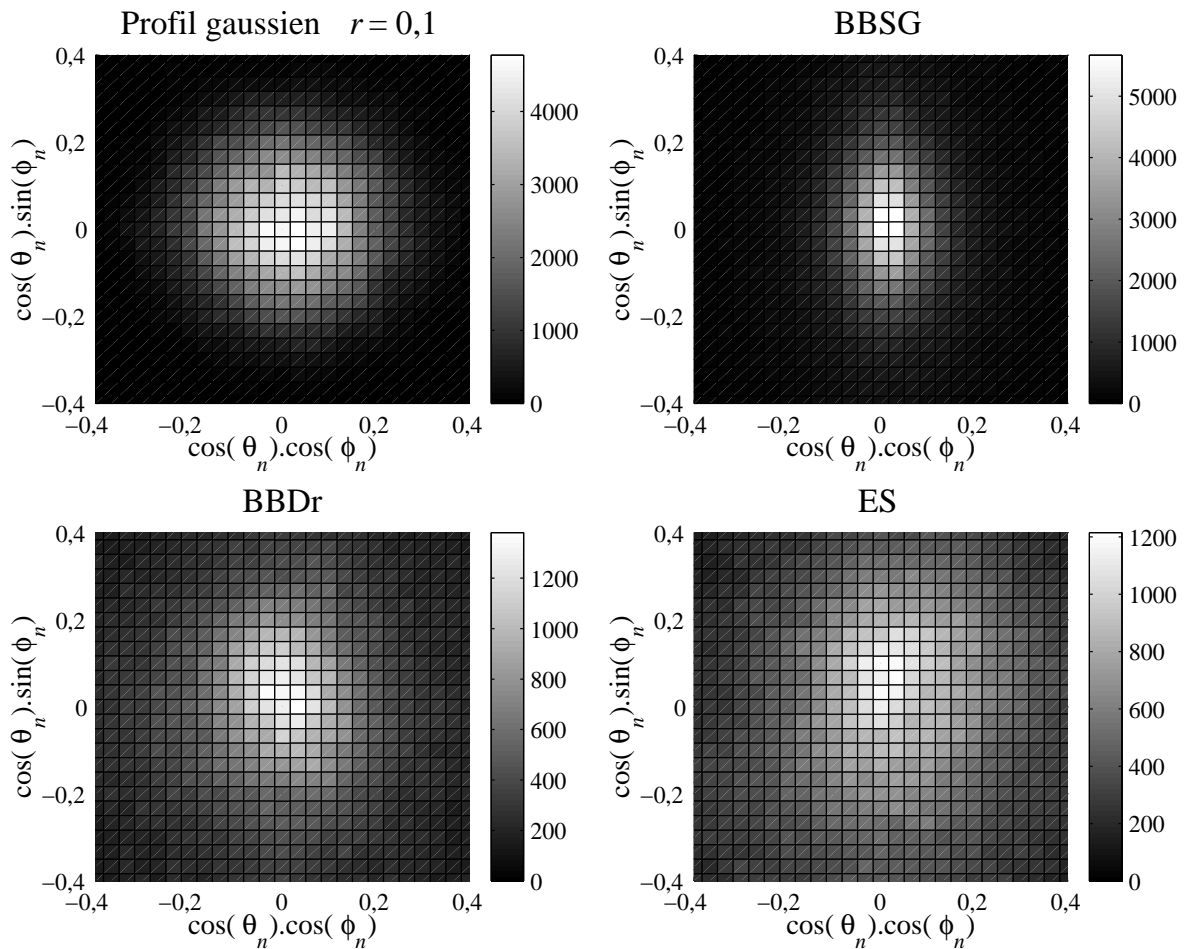


Figure 5.19 Répartition des normales des facettes de différentes surfaces.

Pour mieux mettre en évidence la présence d'une anisotropie, il faut utiliser les distributions de l'angle ϕ_n cumulées pour toutes les valeurs de θ_n . La figure 5.20 montre que, quel que soit le revêtement, la distribution de ϕ_n présente deux pics localisés autour de 90° et 270° . Il existe donc bien une orientation privilégiée des facettes dans ces deux directions, qui correspondent au plan perpendiculaire au plan d'éclairage. L'isotropie de la «surface à profil gaussien» se vérifie quant à elle par une distribution uniforme de l'angle ϕ_n .

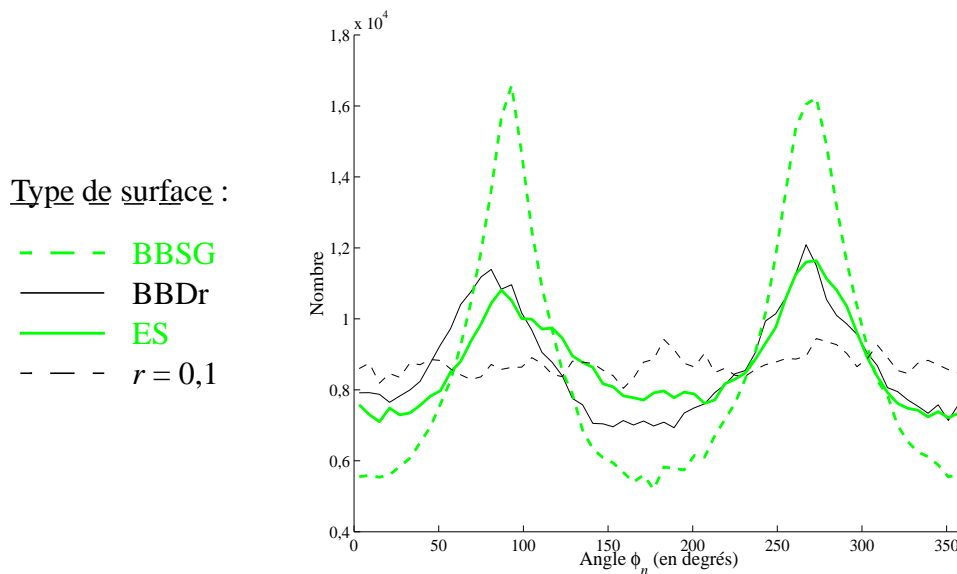


Figure 5.20 Distributions des angles ϕ_n pour différentes surfaces.

5.4.2.2 Le coefficient de «masquage / ombrage» C

L'influence de la texture des revêtements apparaît d'une manière encore plus nette pour les effets combinés de «masquage / ombrage». Comme pour les «surfaces à profil gaussien», deux cas sont distingués : la direction d'observation se trouve dans le plan d'éclairage ou en dehors de ce plan.

a. Cas où les plans d'éclairage et d'observation sont confondus

Dans le plan d'éclairage, c'est-à-dire pour les deux directions d'observation $\phi_r = 0^\circ$ (plan de rétrodiffusion) et $\phi_r = 180^\circ$ (plan de spéclarité), une idée des variations du coefficient C est donnée avec la figure 5.21 pour des angles d'éclairage θ_i de 30° , 60° et 80° .

Les enrobés «fermés» se démarquent à nouveau des autres surfaces par des valeurs beaucoup plus grandes de C , en particulier pour les angles d'éclairage θ_i les plus rasants. Dans ces conditions extrêmes ($\theta_i = 80^\circ$), 75% (pour le BBSG) et 65% (pour le BBM) de la surface est éclairée et vue pour un angle θ_r inférieur à 60° dans la direction de spéclarité et à 80° dans la direction de rétrodiffusion.

Pour les autres revêtements, l'influence de la texture est plus difficile à analyser. Les lois de distribution des hauteurs de ces revêtements sont très différentes les uns des autres (cf. fig. 5.7), alors que leurs coefficients de «masquage / ombrage» ont à peu près la même forme. De plus, dans certaines conditions d'éclairage et d'observation un revêtement donnera des valeurs de C plus élevées qu'un autre revêtement, puis dans de nouvelles conditions ce résultat est inversé. C'est par exemple le cas de l'ES qui donne pour $\theta_i = 60^\circ$ des valeurs de C bien supérieures à celles des BBDr, mais pour $\theta_i = 80^\circ$ des valeurs similaires. Cependant, dans ce cas bien précis, l'aspect de la couche superficielle du revêtement rentre en jeu.

Types de revêtements :

- | | |
|---------|------|
| ○ — ○ | BBDr |
| × - - × | BBTM |
| △ ··· △ | BBM |
| + - - + | BBSG |
| ▽ - - ▽ | ES |

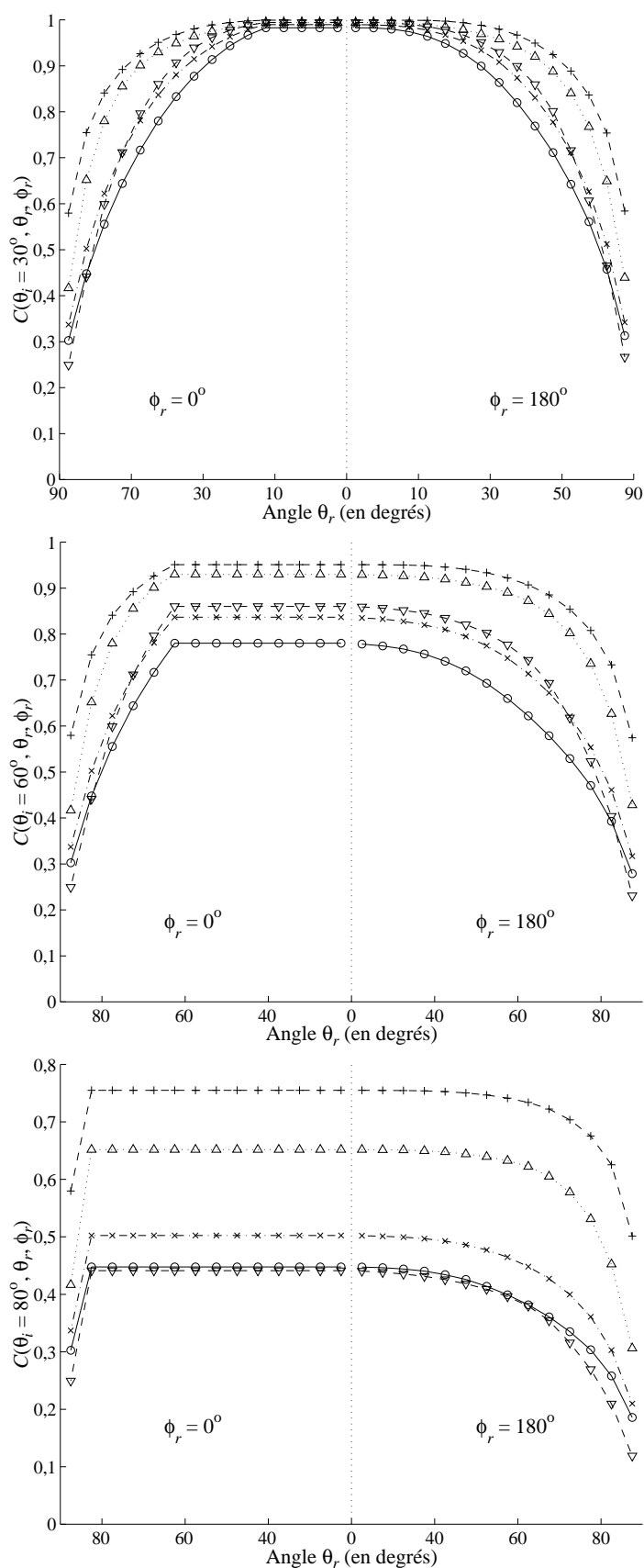


Figure 5.21 Coefficient de « masquage / ombrage » C dans le plan d'éclairage en fonction du type de revêtement.

En effet, comme le montre les schémas de la figure 5.22, la longueur de l'ombre portée par un sommet dépend de l'angle d'incidence θ_i de la lumière, mais aussi de la hauteur du sommet : plus ce sommet est élevé plus l'ombre portée est longue. Dans ces conditions, plus la couche superficielle du revêtement apparaît « lisse », moins les variations des effets de « masquage / ombrage » avec les angles d'éclairage ou d'observation sont rapides. Cette remarque explique les variations plus importantes du coefficient C entre les angles $\theta_i = 60^\circ$ et $\theta_i = 80^\circ$ observées pour l'ES par rapport à celles données par le BBDr.

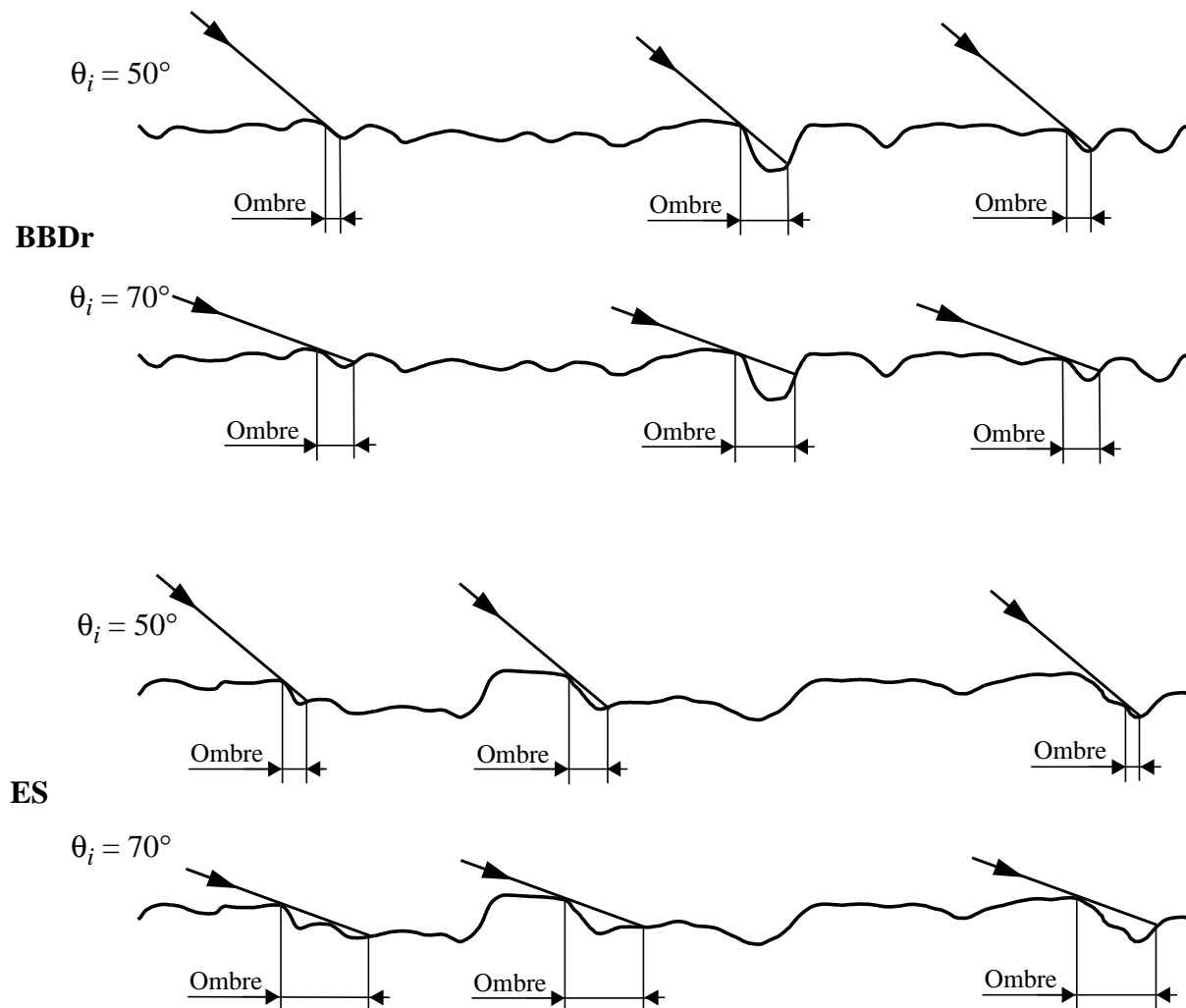


Figure 5.22 Évolution de l'ombre portée en fonction de l'angle d'éclairage θ_i .

Cependant, une relation peut être établie entre les variations du coefficient C et la valeur du paramètre S_{dr} de la surface développée. Les valeurs de S_{dr} du tableau 5.3 et les courbes de la figure 5.21 montrent que plus la surface développée d'un revêtement est grande, plus les effets de « masquage / ombrage » sont importants. Cette règle se vérifie pour la plupart des angles d'éclairage et d'observation, sauf quand ils sont trop rasants. Dans ces conditions particulières, la figure 5.22 indique qu'il faut à nouveau tenir compte de l'aspect de la couche superficielle du revêtement.

La comparaison des résultats précédents de la figure 5.21 avec ceux des «surfaces à profil gaussien» permet de démontrer que la loi de distribution des hauteurs de la surface a une forte influence sur les effets de «masquage / ombrage». En effet, pour les revêtements de chaussée, la fonction d'autocorrélation peut être supposée de forme gaussienne (§ 5.3.2.3). Ces deux types de surface se différencient donc uniquement par la forme de leur loi de distribution des hauteurs.

Un revêtement de chaussée peut être comparé à une «surface à profil gaussien» de deux manières. Ces deux profils peuvent avoir :

- la même rugosité, définie respectivement par $r = \sigma/T$ et $r' = S_q/T$ (§ 5.3.3),
- la même surface développée S_{dr} et d'après la figure 5.12, à la valeur S_{dr} d'un revêtement correspond celle d'une «surface à profil gaussien» de rugosité r'' .

La figure 5.23 présente le coefficient de «masquage / ombrage» C de trois revêtements et ceux des «surfaces à profil gaussien» de rugosité r' et r'' qui leur sont associées. Pour ces dernières, les valeurs du coefficient C sont le résultat du modèle théorique de Beckmann - Smith, qui dans le plan d'éclairage donne une bonne approximation de C (cf. § 4.2.3.1).

Pour un angle d'éclairage θ_i de 60° , il apparaît de grandes divergences entre les valeurs des trois coefficients C d'un revêtement. Dans la majorité des cas, le coefficient C du revêtement est plus petit que celui de la surface de rugosité r' et plus grand que celle de rugosité r'' . Les revêtements de chaussée ont donc une rugosité apparente plus grande qu'une «surface à profil gaussien» (cas de la comparaison avec r'), mais ils présentent une surface développée correspondant à une «surface à profil gaussien» de rugosité plus petite (cas de la comparaison avec r'').

Pour le BBDr, les écarts semblent peu importants avec les valeurs de C obtenues pour la surface de rugosité r' . Mais, ce résultat est un cas particulier qui ne se reproduit pas pour d'autres angles d'éclairage. Par ailleurs, la règle précédente est également valable pour l'enduit superficiel (ES), qui est la surface dont le profil est le plus proche d'un profil gaussien, puisque sa distribution des hauteurs ressemble beaucoup à une loi normale (§ 5.3.2.2).

Toutes ces observations prouvent clairement que les modèles théoriques des effets de «masquage / ombrage» doivent être adaptés aux différentes loi de distribution des hauteurs des revêtements de chaussée. En outre, elles mettent en avant le danger qu'il y a d'utiliser le paramètre de rugosité r' qui ne fait aucune référence à la nature de loi de distribution des hauteurs du revêtement. Le lien entre la valeur de r' et l'aspect de la texture de la surface est faible ce qui peut conduire à des erreurs importantes.

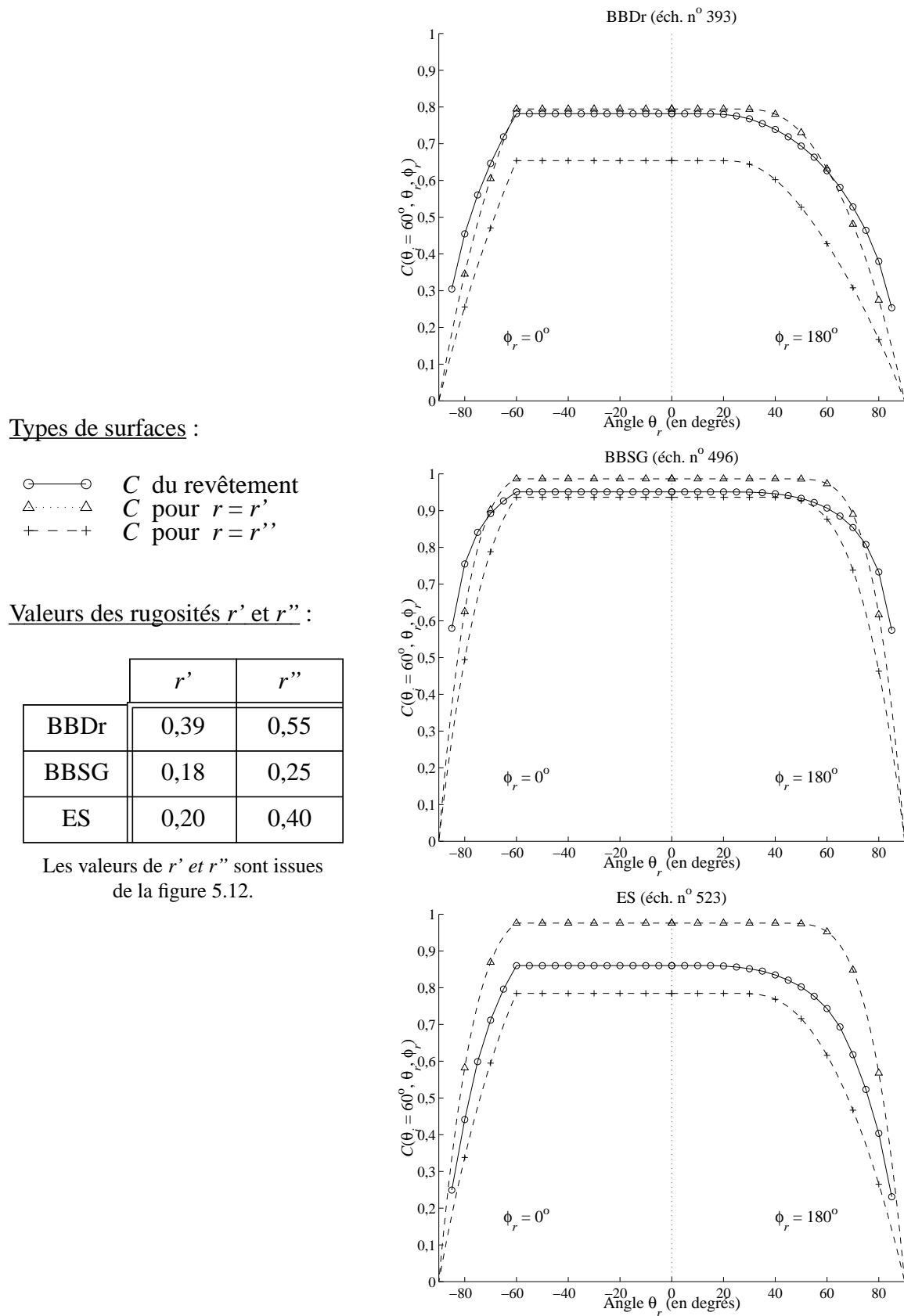


Figure 5.23 Comparaison entre le coefficient de «masquage / ombrage» C d'un revêtement et d'une «surface à profil gaussien».

b. Cas des autres plans d'observation

Pour l'instant, le coefficient de «masquage / ombrage» C n'a été étudié que dans le plan d'éclairage. Avec la figure 5.24, les valeurs de C sont données pour deux enrobés, un BBDr et un BBSG, et pour des directions d'observation ϕ_r se trouvant en dehors de ce plan.

Comme pour les «surfaces à profil gaussien» (cf. §4.2.3), les courbes montrent que le coefficient C dépend de l'angle ϕ_r . Mais, contrairement à ces dernières, les valeurs de C , pour des angles θ_i et θ_r fixés, ne varient pas uniquement entre la valeur maximum $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r = 0^\circ)$ et la valeur minimum $C(\theta_i, \theta_r, \phi_r = 180^\circ)$. Pour les directions d'observation ϕ_r se trouvant autour de 90° , les effets de «masquage / ombrage» deviennent plus importants que dans la direction de spécularité. Ce phénomène, représenté sur la figure 5.24, se répète pour tous les revêtements et pour toutes les incidences θ_i .

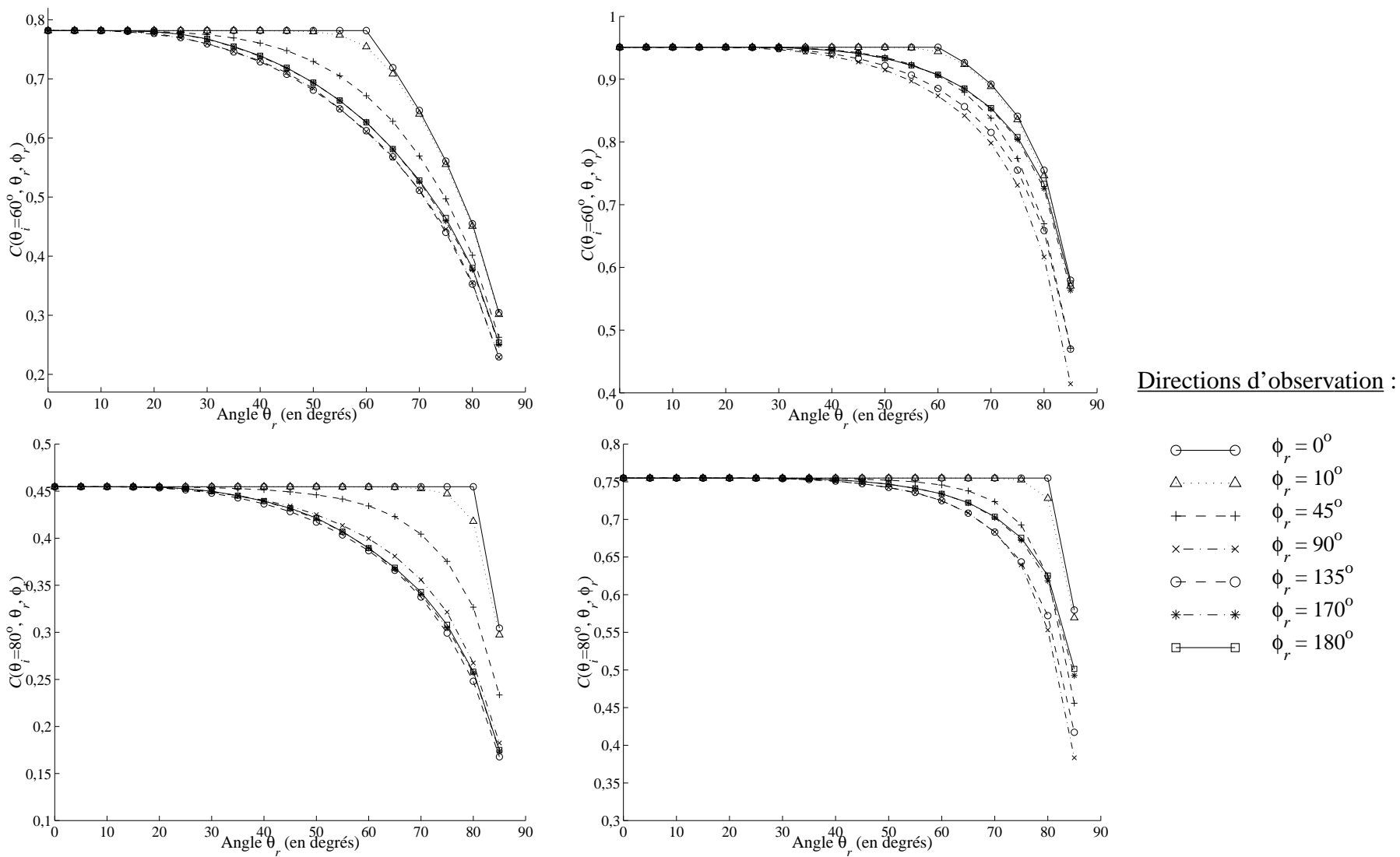


Figure 5.24 Coefficient de «masquage / ombrage» C pour le BBDr (à gauche) et le BBSG (à droite) en fonction des angles d'éclairage θ_i et d'observation (θ_r, ϕ_r) .

La cause de ces variations a peut être pour origine l'anisotropie des revêtements, qui a été mis en évidence avec la fonction de masquage S (§5.4.2.1). Pour vérifier cette hypothèse, les coefficients de «masquage / ombrage» précédents ont donc été à nouveau calculés après que les différents échantillons aient subi une rotation d'un angle δ de 90° , 180° et 270° .

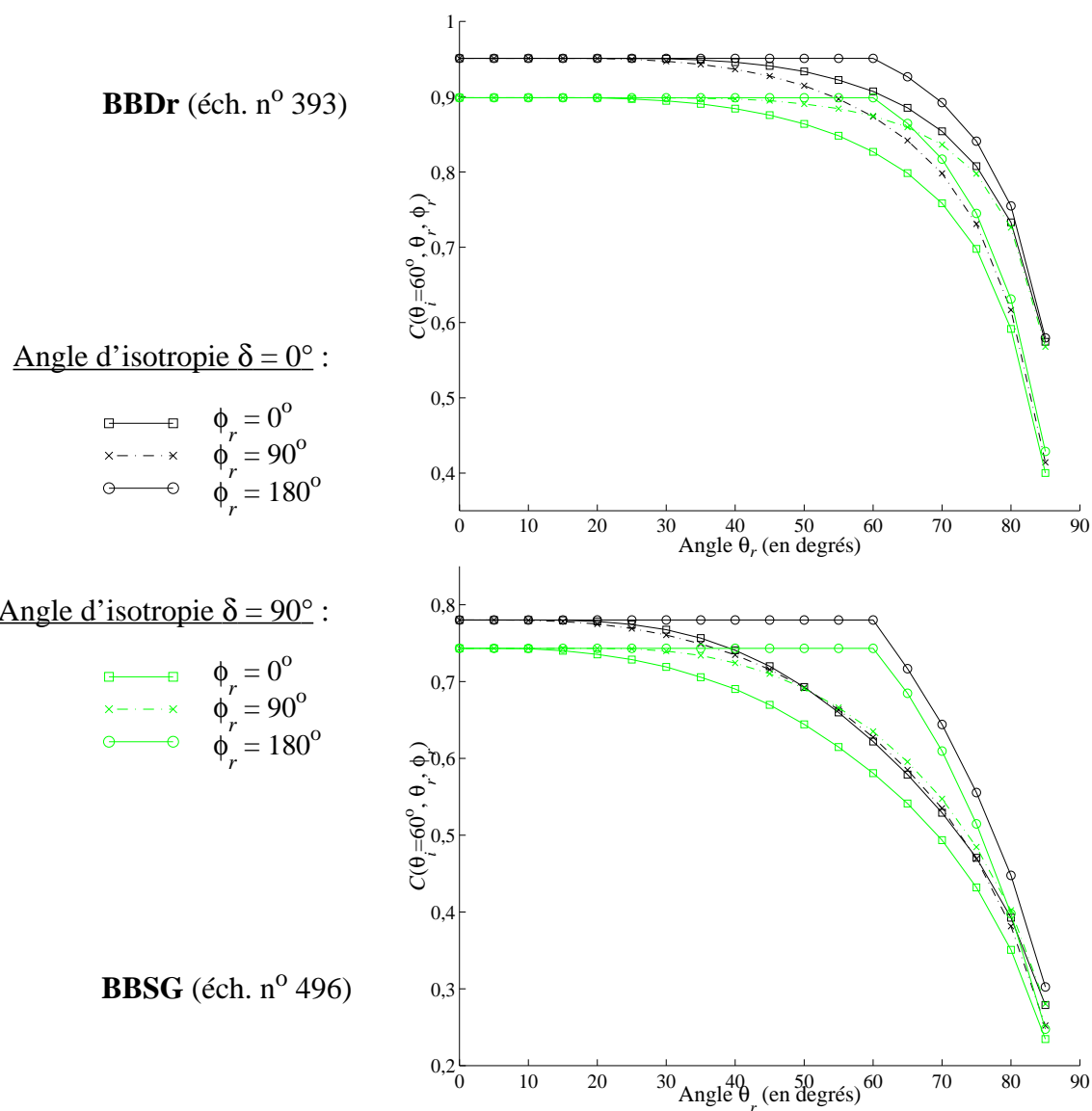


Figure 5.25 Comparaison du coefficient de «masquage / ombrage» C en fonction de l'angle d'isotropie δ .

Pour deux types de revêtement (BBDr et BBSG) et pour un angle d'éclairage θ_i de 60° , la figure 5.25 montre qu'il existe une forte influence de l'angle de rotation, ou d'isotropie, δ . En effet, pour δ égal à 90° , les valeurs du coefficient C sont systématiquement inférieures à celles obtenues pour $\delta = 0^\circ$. Les écarts dépendent du revêtement et ils varient de 5 à 10% pour les angles θ_r proches de la normale, puis sont d'environ 20% pour les angles θ_r rasants. Ces résultats sont identiques pour les angles δ égaux à 180° et 270° . Les courbes correspondantes ne sont pas représentées, car elles sont respectivement confondues avec celles obtenues pour

les angles δ de 0° et 90° . Les graphiques de la figure 5.25 révèlent que, dans aucun des cas, une relation du type

$$C(\theta_i, \theta_r, \phi_r, \delta = (2n) \cdot 90^\circ) = C(\theta_i, \theta_r, \phi_r, \delta = (2n + 1) \cdot 90^\circ)$$

n'est mise en évidence (n est un entier). Comme pour les «surfaces à profil gaussien» (cf. §4.2.3.2), les variations de C avec la direction d'éclairage ϕ_r ne sont donc pas liées à l'anisotropie du profil du revêtement de chaussée. Au contraire, cette propriété semble être intrinsèque à la surface, quelle que soit la forme de sa distribution des hauteurs.

5.4.2.3 Conclusion

L'étude des effets de «masquage / ombrage» effectuée dans les paragraphes précédents a montré que ces effets dépendent fortement de la texture du revêtement. Ils ont d'ailleurs permis de mettre en évidence une certaine anisotropie des revêtements de chaussée.

Ces premiers résultats montrent aussi que les revêtements très «fermés» (comme le BBM et le BBSG) ne donnent pas des effets de «masquage / ombrage» très importants. Cela signifie que même dans des conditions d'éclairage et d'observation rasantes, une grande partie de la surface est éclairée et vue et participe donc directement au coefficient de luminance. Pour les autres types de revêtement, cette surface est beaucoup plus petite, car elle se limite à la couche supérieure du profil. Dans tous ces cas, les facettes éclairées et vues ont une normale «moyenne» orientée suivant l'axe Oz . Cela implique que pour simuler précisément le coefficient de luminance pour des incidences rasantes, il est primordial de connaître les propriétés optiques des constituants dans les mêmes conditions d'éclairage et d'observation.

Par ailleurs, en utilisant le «goniophotomètre virtuel», d'autres applications sont également envisageables pour étudier plus finement les effets de «masquage / ombrage». En effet, il est possible de déterminer la répartition spatiale des facettes éclairées et vues, et surtout la distribution des normales de ces facettes. Ces informations permettraient la formulation d'un modèle de réflexion qui utilise uniquement la loi de distribution des normales correctement orientées pour des directions d'éclairage et d'observation fixées.

5.4.3 Étude du coefficient de luminance

Dans cette partie, le coefficient de luminance des différents échantillons est calculé. Comme pour les «surfaces à profil gaussien», l'influence des propriétés optiques du matériau des revêtements est étudié. Deux cas sont traités : le matériau est spéculaire (§5.4.3.1) et le matériau est parfaitement diffusant (§5.4.3.2). À chaque fois, l'angle d'éclairage θ_i prend les valeurs 40° , 60° et 80° .

5.4.3.1 Cas où le matériau est spéculaire

Dans un premier temps, le coefficient de luminance q est étudié pour les échantillons d'un même type de revêtement. Ceci concerne donc uniquement le BBDr à 20% de vide (éch. 385 - 387), le BBDr à 30% de vide (éch. 392 - 393) et l'enduit superficiel (éch. 523 - 524). Pour quantifier les différences observées, l'écart relatif entre les valeurs de q de chaque échantillon a été utilisé.

Pour l'enduit superficiel (ES), il apparaît que les écarts relatifs sont petits puisque de l'ordre de 5%. En revanche, pour les deux formulations de BBDr, ces écarts prennent des valeurs beaucoup plus grandes allant jusqu'à 20% (ces valeurs sont celles obtenues pour le maximum de $q \cdot \cos(\theta_r)$). Ce résultat est très surprenant car l'analyse des profils de ces échantillons (§5.3.1.2) a montré que les profils mesurés des BBDr sont plus représentatifs que ceux de l'ES.

Par conséquent, il semble que la représentativité d'un échantillon doit être vérifiée suivant au moins deux critères : l'un statistique, qui est lié au profil mesuré de la surface, et l'autre «optique», qui est lié au coefficient de luminance de cet échantillon. Ce problème mériterait d'être analysé plus précisément, car il apparaît également lors d'une mesure réalisée avec le goniophotomètre du LCPC (cf. §3.1). Pour l'instant l'aire éclairée est de $100 \times 100 \text{ mm}^2$, donc voisine de l'aire des profils, mais les résultats précédents semblent indiquer que dans certain cas, cette aire est trop petite.

Dans cette seconde partie, le coefficient de luminance q est étudié en fonction du type de revêtement. Pour les revêtements précédents, pour lesquels deux échantillons sont mesurés, leur coefficient de luminance est la moyenne du coefficient q des deux surfaces.

La comparaison des indicatrices de diffusion de la figure 5.26 avec celles des «surfaces à profil gaussien» (cf. §4.3, figures 4.21 à 4.24) révèle que les revêtements de chaussée se comportent comme des surfaces peu rugueuses. La lumière réfléchie s'étale dans la direction de specularité et forme un lobe autour de cette direction. La forme et l'amplitude du lobe dépend de la texture de la surface. En revanche, dans tous les cas, la rétrodiffusion est toujours inexistante.

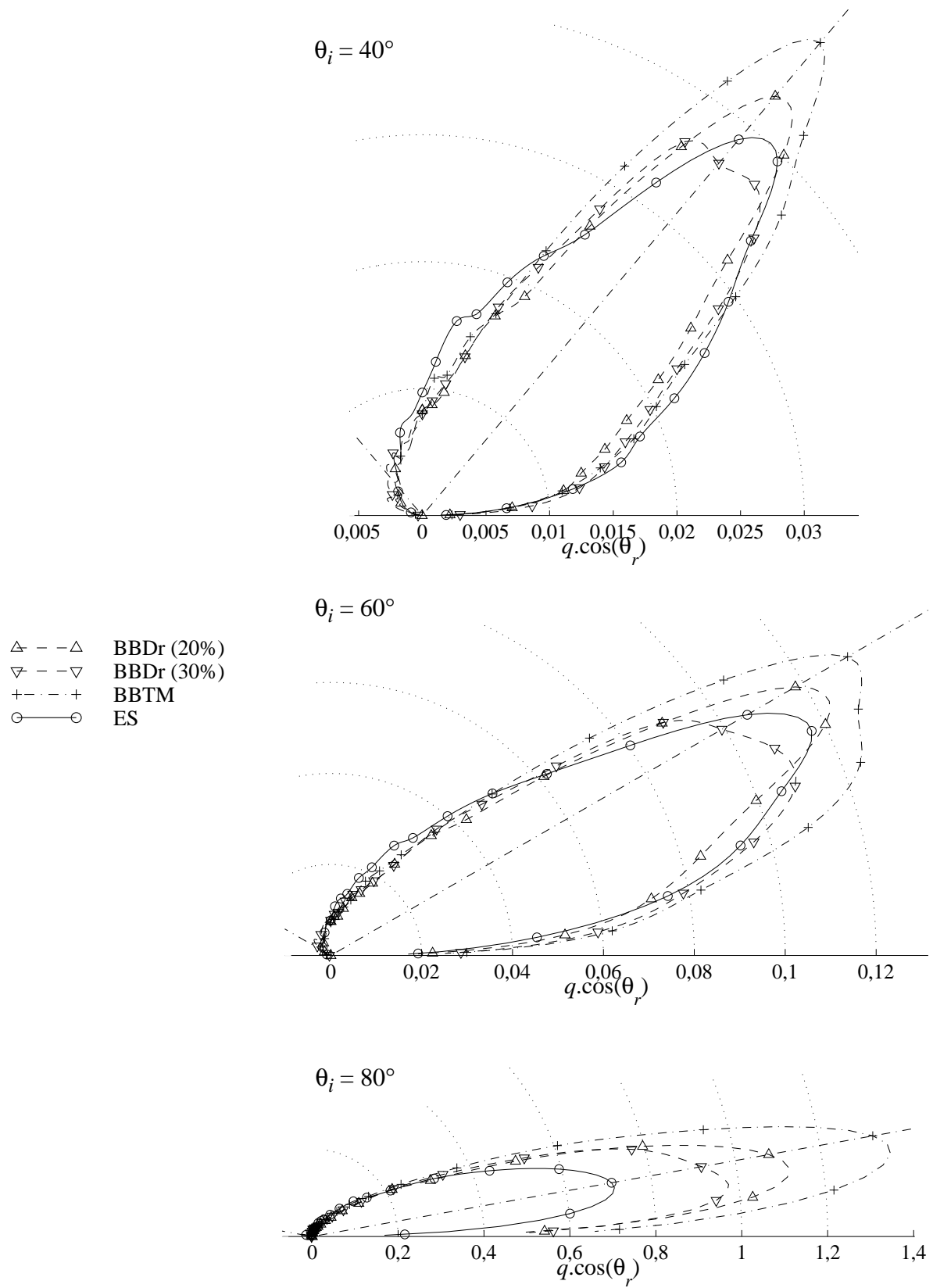


Figure 5.26 Coefficient de luminance q de différents types de revêtement (matériau spéculaire).

Les enrobés «fermés», comme le BBM et le BBSG, se démarquent par un comportement très spéculaire. L'amplitude maximum de leur coefficient de luminance est respectivement 3 et 4 fois plus grande que celle des autres types de revêtement⁶, et ce pour tous les angles d'éclairage. Cette observation est en concordance avec la valeur de la surface développée S_{dr} de ces deux enrobés. Cette valeur est proche de 100% (tableau 5.3) ce qui signifie que le profil ressemble beaucoup à une surface plane sans rugosité. Mais, pour les autres enrobés et l'enduit, il n'apparaît pas de relation entre la valeur de S_{dr} et l'amplitude maximum du coefficient de luminance. L'enduit superficiel est le revêtement le moins spéculaire alors qu'il développe une surface plus petite que celle du BBDr. Cependant, ces remarques devront être confirmées par des simulations sur un nombre plus grand d'échantillons.

L'ensemble de ces résultats montrent à nouveau l'influence de la couche superficielle de la surface. Ils renforcent également l'idée que les types de revêtement se regroupent en trois classes : les enrobés «fermés», les autres enrobés qui paraissent plus ou moins «ouverts» et les enduits.

5.4.3.2 Cas où le matériau est parfaitement diffusant

Le canevas de cette étude est le même que celui suivi pour le matériau spéculaire. Tout d'abord, les coefficients de luminance q des deux BBDr et de l'ES sont comparés deux-à-deux. Cette fois-ci, il n'apparaît pas de différences notables entre les valeurs de q des échantillons et les écarts relatifs sont toujours inférieurs à 5%. Ce résultat s'explique par le comportement aléatoire de la réflexion diffuse. En effet, contrairement à la réflexion spéculaire, la réflexion diffuse n'est pas directive et elle est donc moins sensible à l'orientation des facettes de la surface réfléchissante.

L'étude des indicatrices de diffusion de la tableau 5.27 permet encore une fois de séparer les types de revêtement en deux groupes : d'un côté, les enrobés «fermés» (le BBM et le BBSG), de l'autre les enrobés «ouverts» et l'enduit superficiel. Comme la surface des enrobés «fermés» a une apparence très lisse, leur coefficient de luminance est identique à celui d'une surface plane et aucune influence de l'angle d'éclairage n'est observée.

Pour les autres revêtements, l'influence de la texture des échantillons est très faible. La répartition spatiale de la lumière réfléchie est très proche de celle d'un diffuseur parfait. L'angle d'éclairage θ_i modifie légèrement la forme de l'indicatrice de diffusion par une rotation dans la direction de rétrodiffusion. Cependant, ces effets sont peu marqués.

Finalement, cette étude démontre que si le matériau d'un revêtement de chaussée est parfaitement diffusant, alors cette surface se comporte comme un diffuseur parfait, et ce pour tous les angles d'éclairage.

6. D'ailleurs, pour la lisibilité des courbes de la figure 5.26, leur coefficient de luminance n'est pas représenté.

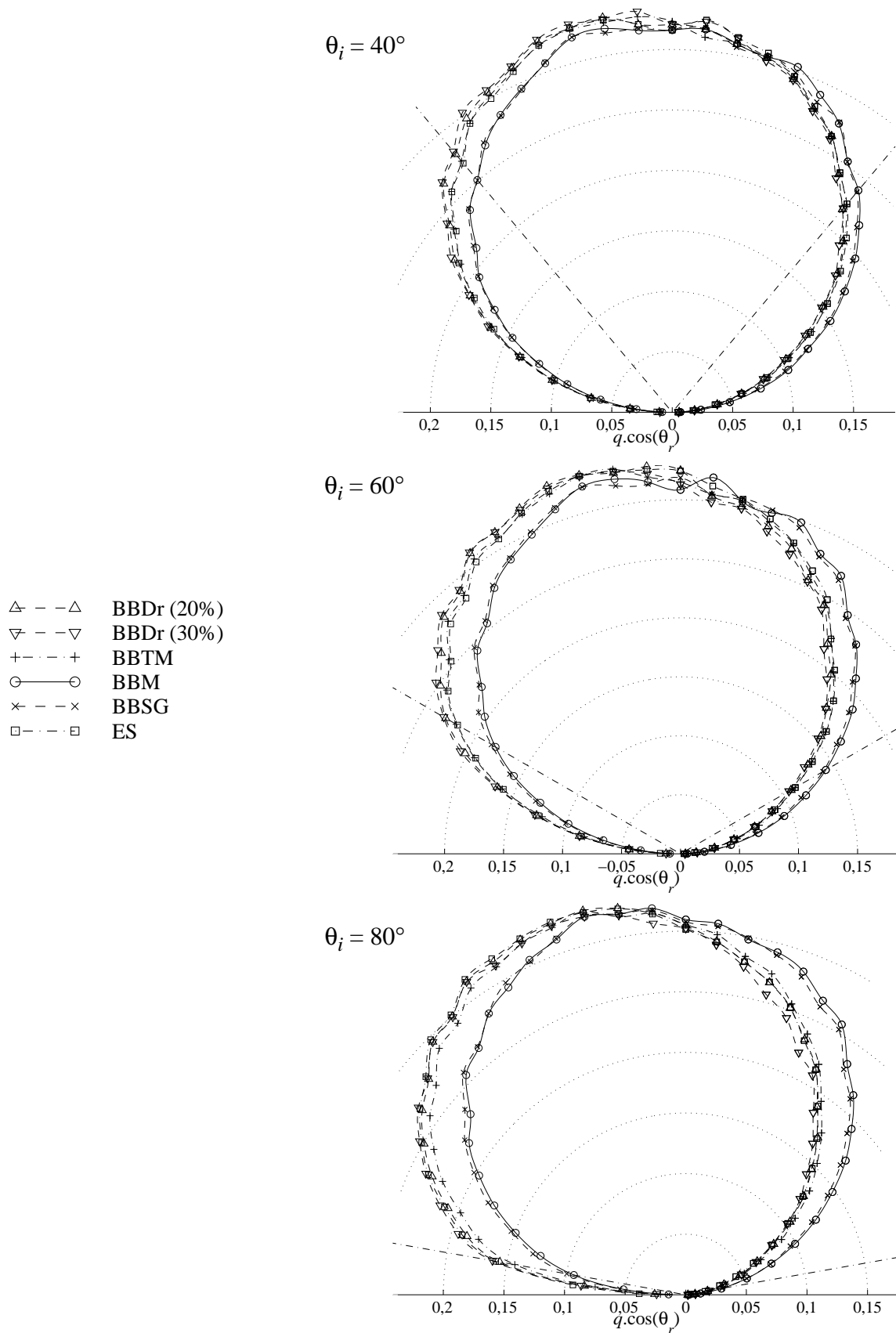


Figure 5.27 Coefficient de luminance q de différents types de revêtement (matériau diffusant).

5.4.3.3 Pour aller plus loin

Les études présentées aux paragraphes 5.4.3.1 et 5.4.3.2 sont très sommaires, puisque le matériau de la surface est supposé avoir des propriétés optiques simples. Néanmoins, la comparaison des différents coefficients de luminance simulés avec ceux d'échantillons mesurés⁷ permet déjà de tirer quelques enseignements.

Tout d'abord, comme le montre la figure 5.28, sous les petites incidences, les revêtements de chaussée se caractérisent par un coefficient de luminance proche d'un diffuseur parfait. Puis, pour les incidences rasantes, ils ont un comportement du type spéculaire associé à une composante diffuse. La comparaison de ces observations avec celles des 5.26 et 5.27 démontre que le matériau d'un revêtement de chaussée ne peut être considéré comme étant ni purement spéculaire, ni parfaitement diffusant.

Par ailleurs, il semble que le matériau de ces surfaces ne peut pas être décrit par une «BRDF aléatoire» qui résulte du mélange d'une composante spéculaire et d'une composante diffuse. En effet, comme l'a démontré l'étude sur les «surfaces à profil gaussien» (cf. §4.3), le coefficient de luminance d'une telle surface est alors comparable à celui donné par la somme des coefficients de luminance obtenus pour un matériau spéculaire (fig. 5.26) et un matériau diffusant (fig. 5.27). Or, les revêtements de chaussée donnent une indicatrice de diffusion qui présente un pic de spécularité trop étendu par rapport à ceux observés avec la figure 5.26 (en particulier pour $\theta_i = 60^\circ$).

Au vu de ces observations, les constituants des revêtements de chaussée doivent donc avoir un comportement optique qui varie fortement en fonction de l'angle d'incidence. D'ailleurs, ce comportement doit ressembler à celui observé sur la figure 5.28 :

- une composante diffuse majoritaire sous les incidences proches de la normale,
- un lobe de spécularité plus ou moins important qui apparaît pour les incidences rasantes.

De plus, avec les revêtements de chaussée, un pic de rétro réflexion est observé pour toutes les incidences. Pour expliquer l'origine de ce pic de rétro réflexion, il semble que les propriétés optiques des matériaux doivent également présenter ce pic. En effet, si la présence de ce pic était liée à la macrotexture de la surface, il serait apparu pour le matériau diffusant. Dans ce cas, le tirage aléatoire de la direction de réflexion fait que toutes les directions d'observation reçoivent de l'énergie. Une disposition particulière du profil devrait alors privilégier certaines directions, ce qui n'a jamais été observé.

Toutes les remarques précédentes montrent que la connaissance des propriétés optiques des matériaux des revêtements de chaussée est donc primordiale. Ceci permettra alors d'obtenir des simulations beaucoup plus réalistes et donc une étude plus approfondie des phénomènes de réflexions.

7. Suite à des problèmes rencontrés avec le goniophotomètre du LCPC, les mesures expérimentales ne sont pas possibles à l'heure actuelle. Les mesures présentées avec la figure 5.28 ont été réalisées il y a plusieurs années mais les conditions expérimentales ne sont pas clairement définies. Les unités de q sont donc choisies arbitrairement et elles ne doivent pas être comparées aux valeurs obtenues par les simulations. Toutefois, ces mesures donnent une idée générale de la forme de l'indicatrice de diffusion des revêtements de chaussée.

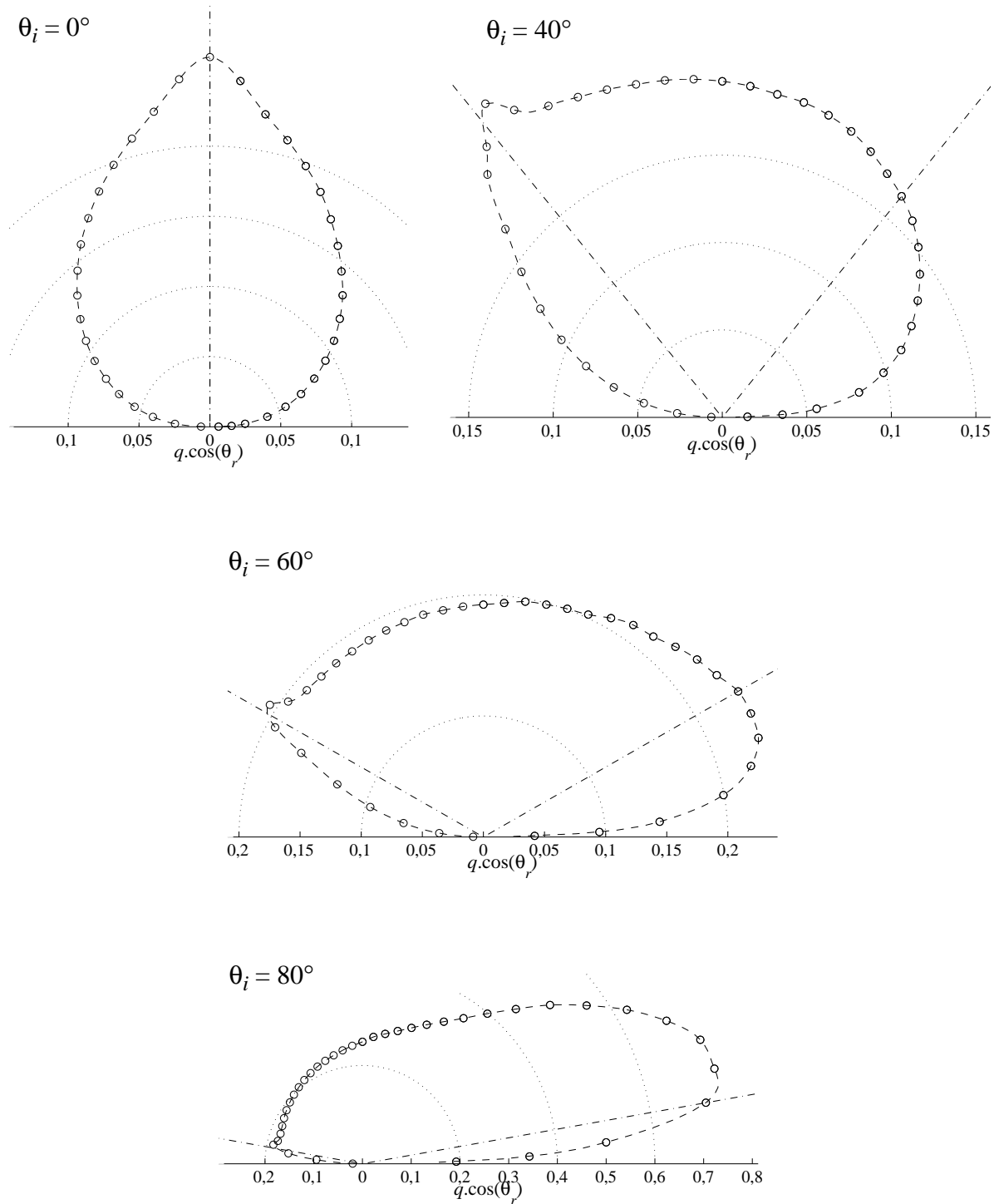


Figure 5.28 Coefficient de luminance q mesuré pour un BBDr (à 20% de vide).

Pour l'instant, les différentes simulations ont toujours supposé que le matériau des surfaces est unique, tout du moins pour ces propriétés optiques. Or, ce n'est vraisemblablement pas le cas puisqu'un revêtement se compose de granulats et de liants (§5.1.1). Ici, la difficulté est de pouvoir mesurer séparément le coefficient de luminance de ces deux constituants. Une fois que cela aura été réalisé, une étude intéressante consiste à analyser l'influence respective de ces deux constituants sur le coefficient de luminance total de la surface.

Cependant, la mesure de la répartition spatiale des constituants ne peut pas être réalisée avec TRIDIM. Pour cela, il faut utiliser une méthode approximative et deux cas sont envisageable :

- Définir un plan horizontal placé à une altitude h_0 et au-dessus duquel se trouve uniquement les granulats et en dessous le mastic.
- Utiliser des photographies des revêtements et par traitement d'image isoler les granulats du mastic (ceci n'est applicable que dans le cas où le revêtement est usagé, car les granulats sont décapés et ils présentent une couleur plus claire que le mastic).

L'ensemble de ce travail n'a pas pu être réalisé au cours de cette thèse. Il sera certainement poursuivi dans les prochains mois et d'ailleurs la collecte d'échantillons de granulats et de mastics a déjà commencé.

Conclusion

L'étude des caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée est un problème difficile du fait de la structure et de la composition particulière de ces surfaces. En effet, ces revêtements sont principalement constitués de granulats, dont la taille est de l'ordre de la dizaine de millimètres, et de mastic qui permet de lier entre eux les granulats. Il apparaît donc que ces surfaces se décomposent en deux matériaux qui *a priori* n'ont pas les mêmes propriétés optiques. Par ailleurs, d'un point de vue «géométrique», les revêtements de chaussée se distinguent par la présence de deux échelles de texture : une macrotexture liée à la dimension des granulats et une microtexture qui se retrouve sur les facettes des granulats et sur le mastic (irrégularités de l'ordre d'une centaine de micromètre).

Il existe de nombreux modèles théoriques, comme le modèle de «l'approximation de Kirchhoff», qui cherchent à décrire le coefficient de luminance d'une surface rugueuse. Mais, les hypothèses qu'ils utilisent limitent leur champ d'application. En particulier, ils ne peuvent pas prendre en compte la présence simultanée de deux échelles de texture et de deux matériaux aux caractéristiques optiques différentes. Dans ces conditions, ils ne sont pas adaptés au cas où la surface de réflexion est un revêtement de chaussée.

Le «goniophotomètre virtuel» développé au cours de cette thèse a pour objectif de s'affranchir des différentes limitations imposées par les modèles théoriques. Ainsi, il est possible de calculer le coefficient de luminance d'une surface rugueuse quelconque, et par extension celui d'un revêtement de chaussée. Lors d'une simulation, l'échantillon étudié est représenté précisément par le profil de sa surface et par les propriétés optiques du ou des matériaux qui composent cette surface. Le profil est donné par un échantillonnage bi-dimensionnel régulier qui est mis sous la forme d'une matrice des altitudes. La surface est donc décomposée en un ensemble de facettes (dont la taille doit être très supérieure à la longueur d'onde de la lumière incidente). À chacune des facettes, un matériau lui est associé. La nature du matériau choisi, mais aussi l'état de surface de la facette (c'est-à-dire l'état de sa microtexture), sont à l'origine des propriétés optiques de ces facettes. Ces propriétés sont décrites soit par des modèles physi-

ques simples (réflexion spéculaire ou diffuse), soit par un modèle mathématique qui représente un coefficient de luminance local. En particulier, ce modèle peut être calé sur des mesures expérimentales du coefficient de luminance du matériau. Cette description des caractéristiques physiques de l'échantillon associée à la technique du «lancer de rayons» permet de déterminer de manière précise la répartition spatiale de la lumière réfléchie par cet échantillon.

Pour valider le «goniophotomètre virtuel», il faut pouvoir comparer les résultats d'une simulation réalisée pour une surface précise avec des données obtenues par une autre méthode. Les prédictions d'un modèle théorique ont été préférées à des données expérimentales, car l'avantage d'un modèle est de fixer complètement toutes les hypothèses concernant le profil et les propriétés optiques de la surface. Le modèle de «l'approximation de Kirchhoff», utilisé pour des «surfaces à profil gaussien» (la hauteur est une variable aléatoire qui suit une loi de distribution normale et dont la fonction d'autocorrélation est une gaussienne) et pour un matériau spéculaire, a été choisi. Dans ces conditions particulières, les résultats des simulations ont permis de valider le «goniophotomètre virtuel» pour différentes directions d'éclairage et rugosités de surface. Pour aller plus loin, il est nécessaire d'utiliser des surfaces réelles dont le profil et le coefficient de luminance ont été mesurés. Mais en raison de plusieurs problèmes techniques, ce travail n'a pas encore été réalisé. Cependant, grâce aux premiers résultats, il semble possible d'étendre l'utilisation du «goniophotomètre virtuel» à toutes les surfaces, en particulier aux revêtements de chaussée.

Le «goniophotomètre virtuel» ouvre de nouvelles possibilités d'étude des phénomènes de réflexion de la lumière par une surface rugueuse. Dans un premier temps, il a été utilisé sur des surfaces synthétiques à «profil gaussien». Les nouveaux résultats obtenus dans ce cas précis peuvent être comparés aux hypothèses des différents modèles théoriques. Tout d'abord, il a été observé que les réflexions multiples donnent une contribution très faible au coefficient de luminance total de la surface. Cette règle est valable pour toutes les incidences et quelles que soient les propriétés optiques du matériau de la surface. La seule restriction est liée à la rugosité de la surface ; les surfaces très rugueuses donnent en proportion plus de réflexions multiples dont l'énergie ne peut pas être négligée.

Le second résultat inédit concerne les effets de «masquage / ombrage» liés à la rugosité des surfaces et qui sont habituellement modélisés par l'intermédiaire d'un coefficient. À nouveau, le «goniophotomètre virtuel» a permis de calculer ce coefficient et de contredire les prévisions des différents modèles théoriques. Dans le plan d'éclairage, une bonne concordance a été trouvée entre les modèles et les simulations, mais ces dernières montrent également que le coefficient de «masquage / ombrage» dépend de la direction d'observation. Or, la variation de ce coefficient n'est pas prédite par les modèles qui supposent qu'en dehors du plan de rétrodiffusion les effets de «masquage / ombrage» sont toujours les mêmes.

Toutes ces études réalisées pour des surfaces à «profil gaussien» peuvent être étendues à d'autres surfaces synthétiques (par exemple, des surfaces avec une autre loi de distribution des hauteurs, des surfaces fractales) ou encore à des surfaces réelles comme les revêtements de chaussée. Mais, avant de pouvoir envisager cette dernière application, il est nécessaire de mesurer le profil de ce type de surface. À l'origine, un nombre important d'échantillons aurait dû être mesuré avec l'appareil TRIDIM du LCPC-Nantes. Malheureusement, des problèmes instrumentaux ont empêché ces mesures. De ce fait, la représentativité des relevés des profils n'a pas été entièrement vérifiée et il s'en suit, qu'à l'heure actuelle, les résultats des études

effectuées sur les revêtements de chaussée ne peuvent pas être généralisés au type du revêtement auquel appartient l'échantillon. Cependant, ces résultats fournissent une idée générale des comportements auxquels il faut s'attendre.

À nouveau, il a été clairement mis en évidence que les réflexions multiples ont une contribution négligeable au coefficient de luminance des revêtements de chaussée. Cette information est intéressante, car elle signifie qu'il suffit d'étudier uniquement le comportement des réflexions simples. L'élaboration d'un modèle théorique appliqué aux revêtements de chaussée devient alors beaucoup plus simple.

L'étude des effets de «masquage / ombrage» est plus délicate, car ces effets dépendent fortement de la texture du revêtement. La leçon qui peut être tirée des premiers résultats est que les revêtements très «fermés» (comme le BBM et le BBSG) ne donnent pas des effets de «masquage / ombrage» très importants. Cela signifie que même dans des conditions d'éclairage et d'observation rasantes, une grande partie de leur surface est éclairée et vue et participe au coefficient de luminance. Pour les autres types de revêtement, cette surface est beaucoup plus petite et elle se limite alors à la couche supérieure du revêtement. Ces informations impliquent que pour simuler précisément le coefficient de luminance pour des angles rasants, il est primordial de connaître les propriétés optiques des constituants dans les mêmes conditions d'éclairage et d'observation.

Comme l'ont démontré les premiers résultats obtenus sur des revêtements de chaussée, les perspectives d'étude offertes par l'emploi du «goniophotomètre virtuel» sont nombreuses. Mais, avant de les explorer, il est nécessaire d'améliorer les connaissances sur ce type de surfaces avec pour objectif d'avoir une meilleure description des échantillons utilisés. Ces connaissances doivent donc concerner la description «géométrique» des profils et la description «optique» des constituants de ces surfaces.

Dans un premier temps, la représentativité des mesures de profils doit être analysée. Il s'agit de vérifier d'une part, la représentativité «ponctuelle» de la mesure pour deux échantillons d'un revêtement prélevés dans les mêmes conditions. Dans ce cas, ce qui est important c'est de définir la taille minimum de la surface mesurée et la valeur du pas d'échantillonnage. D'autre part, il faut considérer la représentativité des mesures pour des échantillons d'un même type de revêtement, c'est-à-dire des échantillons qui n'ont plus exactement la même composition. Le but de cette étude, qui demande un nombre important d'échantillons, est également de déterminer les paramètres statistiques qui caractérisent les profils. L'étude succincte de ces paramètres présentée au chapitre 5 a montré la difficulté pour déterminer les paramètres les plus pertinents. Par la suite, ces mesures permettront de définir une typologie des profils en fonction des paramètres précédents et du type de revêtement. Une classification suivant un schéma identique à celle de la CIE pourrait alors être envisagée.

L'autre étude primordiale concerne les propriétés optiques des constituants des revêtements: les granulats et les mastics. Ces propriétés peuvent être mesurées à l'aide du gonioréfectomètre du LCPC. La difficulté est ici d'avoir des échantillons de chacun des constituants pris isolément. Pour l'instant, aucune de ces mesures n'a été réalisée, mais la collecte des échantillons a déjà débuté. Cette étude devrait donc se poursuivre dans les prochains mois.

Toutes ces données permettront une validation définitive du «goniophotomètre virtuel» par la comparaison pour les mêmes échantillons des valeurs des simulations avec des mesures expérimentales. Puis, différentes études plus précises sont envisageable. À chaque fois, c'est l'influence des paramètres du revêtement sur son coefficient de luminance qui seront recherchés. L'avantage apporté par le «goniophotomètre virtuel» est de pouvoir changer à volonté les paramètres des surfaces. Par exemple, pour un type de revêtement donné, la nature des granulats ou du mastic peut être modifiée pour ainsi analyser son influence sur le coefficient de luminance. En résumé, l'évolution du coefficient de luminance des revêtements de chaussée sera analysée en fonction :

- de la texture du revêtement,
- des propriétés optiques des constituants d'un revêtement,
- de la part respective de ces différents constituants.

Dans un futur plus lointain, d'autres applications sont également envisageable. Il s'agit d'une part, de l'étude de l'évolution du coefficient de luminance avec l'âge du revêtement et d'autre part, de l'étude des propriétés photométriques des revêtements dans des conditions humides. Dans chacun de ces cas, la texture du revêtement est peu modifiée et ce sont principalement les propriétés optiques des constituants de la surface qui changent.

Annexes

A.1 Génération des «surfaces à profils gaussiens»

Les «surfaces à profil gaussien» constituent une famille particulière des surfaces rugueuses. En effet, la hauteur $z(\mathbf{r})$ en tout point de la surface est supposée être une variable aléatoire qui vérifie les propriétés statistiques suivantes :

- La distribution $p(z)$ des hauteurs z est une loi normale centrée :

$$\begin{aligned}\mu &= \langle z(\mathbf{r}) \rangle = 0 \\ \sigma &= \langle z^2(\mathbf{r}) - \mu^2 \rangle = \langle z^2(\mathbf{r}) \rangle \\ p(z) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2\sigma^2}\end{aligned}\tag{A.1-1}$$

- La fonction d'autocorrélation normalisée $B(\tau)$ est une gaussienne¹ :

$$\begin{aligned}B(\tau) &= \langle z((\mathbf{r} + \tau) \cdot z(\mathbf{r})) \rangle \\ &= e^{-\tau^2/T^2}\end{aligned}\tag{A.1-2}$$

où $\tau^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ et T est la longueur de corrélation de la surface. Plus la longueur T est grand, plus la surface est corrélée et plus ses ondulations sont douces (dans ces équations, les crochets $\langle \rangle$ représentent la moyenne prise sur tous les vecteurs \mathbf{r}).

Pour générer des surfaces aléatoires, qui suivent les propriétés statistiques mentionnées ci-dessus, la procédure indiquée par Garcia et Stoll [GAR 84] est reprise. En partant d'une grille discrète du plan Oxy , un bruit blanc $S(z)$ gaussien est généré. La distribution des hauteurs de S est alors identique à la distribution des hauteurs $p(z)$ de l'équation (A.1-1). À ce stade, les caractéristiques statistiques de la surface sont les suivantes :

- moyenne $\mu = \langle S(z) \rangle = 0$,
- écart-type $\sigma = \langle S^2(z) \rangle$,
- fonction d'autocorrélation² $B(\tau) = \delta(\tau)$.

La surface définie par la distribution $S(z)$ n'est donc pas corrélée.

Pour corrélérer cette surface, celle-ci doit être convoluée par un filtre $F(\tau)$. Ce filtre est caractérisé par une fonction de τ identique à la fonction de corrélation désirée. Dans le cas d'une fonction de corrélation gaussienne, le filtre $F(\tau)$ est donc égal à la définition de $B(\tau)$ donnée par l'équation (A.1-2).

1. La fonction d'autocorrélation $C(\tau)$ est relié à la fonction $B(\tau)$ par : $C(\tau) = \sigma^2 B(\tau)$.

2. $\delta(\tau)$ est la fonction de Dirac qui vaut 1 pour $\tau = 0$ et 0 dans tous les autres cas.

Le calcul du produit de convolution est le résultat de la double intégrale suivante :

$$z(\mathbf{r}) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau(\mathbf{r}) - \tau(\mathbf{r}')) B(z(\mathbf{r}')) d\mathbf{r}' \quad (\text{A.1-3})$$

En pratique, la surface n'est pas continue et la hauteur $z(\mathbf{r})$ est une variable discrète. La surface est donc donnée par une matrice qui en représente un échantillonnage particulier. Le produit de convolution (A.1-3) se réduit alors à une double somme sur l'ensemble des points de la surface. Pour diminuer le temps de calcul du produit de convolution, le domaine des fréquences spatiales est utilisé par l'intermédiaire des transformées de Fourier.

Afin assurer une représentation identique de la surface pour toutes les longueurs de corrélation T , le pas d'échantillonnage de la surface est relié à T . Cela revient à toujours échantillonner la fonction de corrélation $F(\tau)$ de la même manière. La méthode utilisée consiste pour la valeur remarquable $\exp(-\tau^2/(2T^2)) = e^{-1}$ à avoir $\tau = \sqrt{2}T = m \cdot p$. m est un nombre de pas d'échantillonnage et p la valeur de ce pas.

Comme les surfaces générées sont ensuite utilisées par le goniophotomètre virtuel, leur taille en nombre de points ne peut pas être trop grande. Des tests ont montré que la limite supérieure est constituée par une matrice de 1024 par 1024 points. Pour avoir une bonne représentation de la surface, sa largeur doit être proportionnelle à un nombre n assez grand de longueur de corrélation T . D'un autre côté, pour que la surface soit décrite finement, le nombre m de pas d'échantillonnage de la fonction de corrélation doit être le plus grand possible.

Après plusieurs tests, un compromis entre les nombres m et n et la valeur de p a été trouvé. Les valeurs suivantes ont été retenues :

- $m = 30$,
- $p = 0,04725$ pour une longueur de corrélation $T = 1$.

Ces choix donnent approximativement une valeur de n égale à 15 (les unités de longueur de σ , T et p sont ici arbitraires).

Pour les surfaces dont la longueur de corrélation T est différente de 1, il suffit simplement de modifier la valeur du pas d'échantillonnage p . Par exemple, pour avoir $T = 10$, il faut que le pas d'échantillonnage soit égal à $p' = 10 \cdot p = 0,4725$. Cette méthode simple permet de limiter le nombre de surfaces à générer. Physiquement, elle est équivalente à un étirement de la surface dans le plan Oxy , sans modification des hauteurs, donc la valeur de l'écart-type σ reste la même.

Si pour une surface donnée, la valeur de σ doit être modifiée, il suffit alors de multiplier toutes les hauteurs par un coefficient. Dans ce cas, les valeurs minimales et maximales des hauteurs changent. Cependant, dans tous les cas, 99,8% des hauteurs ont des valeurs comprises dans l'intervalle $[-3\sigma ; +3\sigma]$.

Pour chaque surface générée, les hypothèses de départ sont vérifiées en traçant l'histogramme des hauteurs et en calculant la fonction d'autocorrélation de la surface. Dans les graphiques de la figure A.1.1, ces données sont tracées pour une surface dont les paramètres recherchés sont $\sigma = 1$ et $T = 1$. Les hypothèses de départ sont correctement vérifiées et les deux coupes de la fonction d'autocorrélation $B(\tau)$ montrent que la surface est bien isotrope.

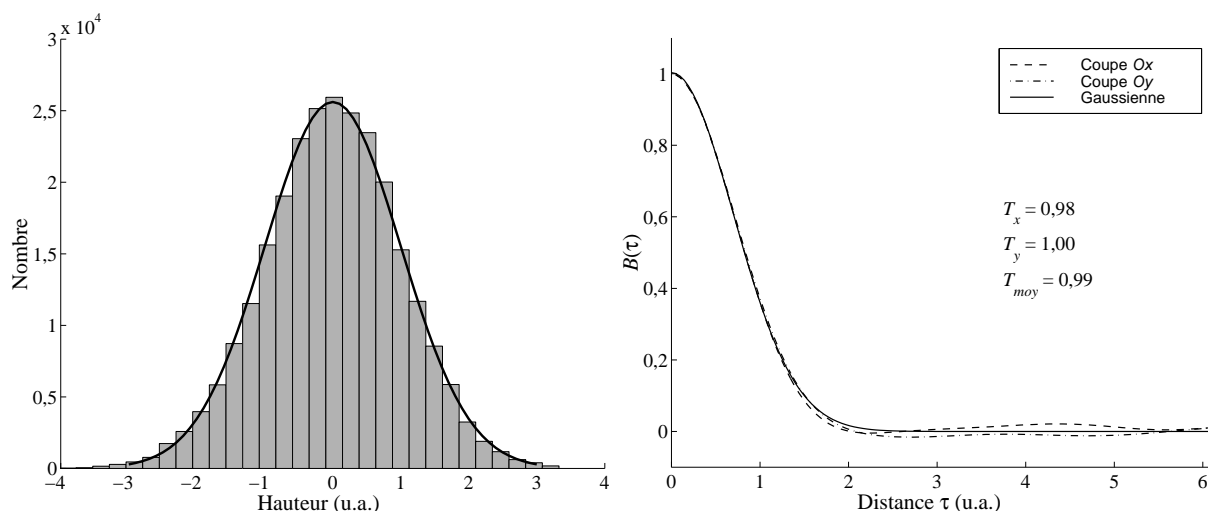


Figure A.1.1 Distribution des hauteurs et fonction d'autocorrélation pour une «surface à profil gaussien» : $\sigma = 1$ et $T = 1$.

Paramètres de la surface :

$$\sigma = 1 \text{ mm}$$

$$T = 1 \text{ mm}$$

$$p = 0,04725 \text{ mm}$$

$$n_x = n_y = 512$$

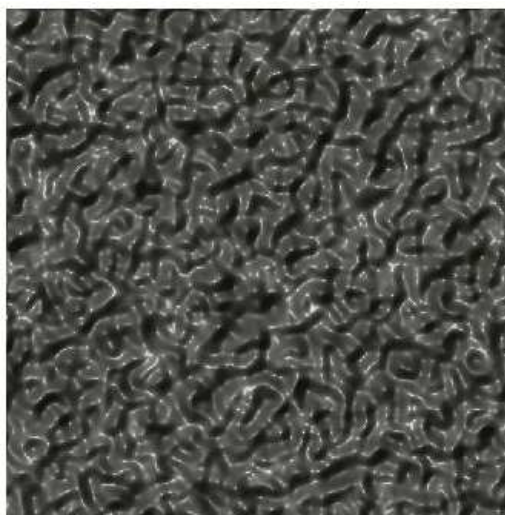


Figure A.1.2 Image d'une «surface à profil gaussien».

A.2 Calcul de l'angle solide des capteurs

La méthode utilisée pour déterminer les valeurs des angles solides des capteurs s'inspire du calcul du facteur de forme très employé dans le domaine de la synthèse d'image (méthode de la radiosité [SIL 94]). Pour deux surfaces élémentaires dS_1 et dS_2 , le facteur de forme dF_{dS_1, dS_2} est défini comme la proportion de la puissance totale quittant dS_1 et reçue par dS_2 . En utilisant les notations de la figure A.2.1, le facteur de forme dF_{dS_1, dS_2} est donné par :

$$dF_{dS_1, dS_2} = \frac{\cos(\theta)\cos(\theta')dS_2}{\pi r^2} \quad (\text{A.2-1})$$

C'est une quantité purement géométrique donc sans dimension.

La définition précédente est étendue en considérant le facteur de forme entre un point x de l'élément de surface dS_1 et une surface S d'aire finie. Le facteur de forme $F_{x,S}$ est obtenu en intégrant l'expression (A.2-1) sur tous les éléments dS_2 de S :

$$F_{x,S} = \int_{S_2 \in S} \frac{\cos(\theta)\cos(\theta')}{\pi r^2} V(x, S_2) dS_2 \quad (\text{A.2-2})$$

La fonction $V(x, S_2)$ est la fonction de visibilité, qui vaut 1 si S_2 est entièrement vue depuis x , et 0 dans le cas contraire. Dans le calcul des angles solides, la fonction de visibilité V est toujours égale à 1.

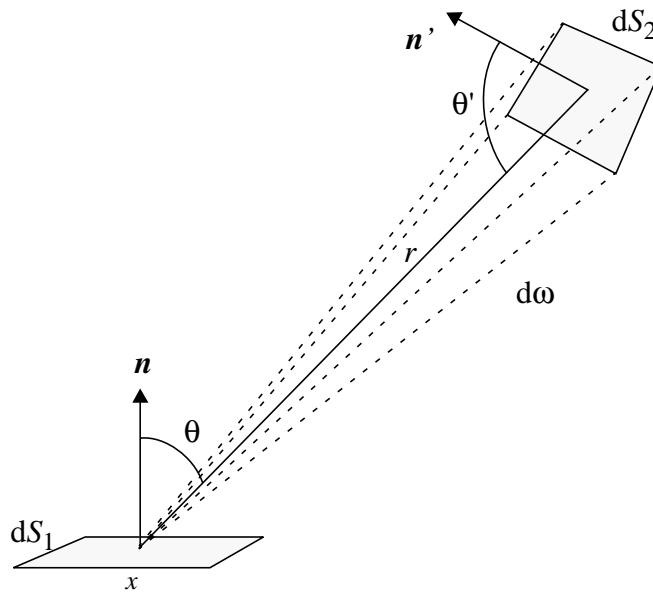


Figure A.2.1 Facteur de forme entre deux éléments de surface dS_1 et dS_2 .

L'équation (A.2-2) de $F_{x,S}$ ne peut pas être résolue pour une surface S de forme quelconque. Cependant, pour le cas particulier des polygones convexes et plans, Lambert a donné en 1760 l'expression exacte de $F_{x,S}$:

$$F_{x,S} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{N-1} \mathbf{n} \cdot \mathbf{G}_i \quad (\text{A.2-3})$$

où N est le nombre de cotés du polygone définissant S . Les vecteurs \mathbf{G}_i sont définis par les relations :

$$\mathbf{G}_i = \gamma_i \frac{\mathbf{R}_i \times \mathbf{R}_{i+1}}{\|\mathbf{R}_i \times \mathbf{R}_{i+1}\|}$$

$$\gamma_i = \arccos(\mathbf{R}_i \cdot \mathbf{R}_{i+1})$$

Les vecteurs \mathbf{R}_i ainsi que les angles γ_i sont représentés sur la figure A.2.2.

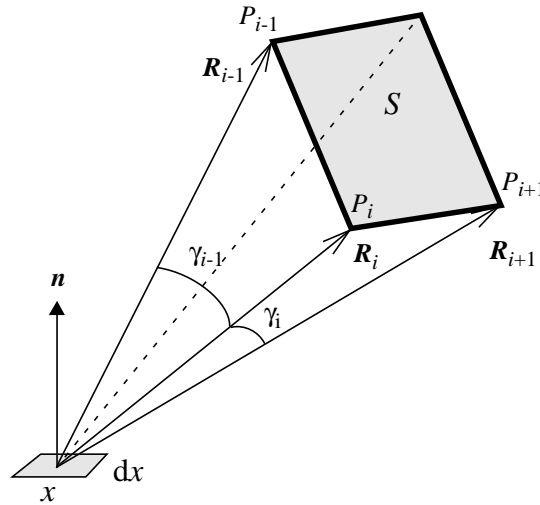


Figure A.2.2 Calcul du facteur de forme entre le polygone S défini par les points P_i et le point x de l'élément de surface dx de normale \mathbf{n} .

Une autre approche pour résoudre l'équation (A.2-2) est d'utiliser l'«analogie de Nusselt» [SIL 94]. Pour cela, le point x de l'élément de surface dS_1 est placé au centre de la base d'un hémisphère de rayon unitaire (fig. A.2.3). En traçant des droites entre x et les bords de la surface S , les contours de S sont projetés sur la surface de l'hémisphère. Cette nouvelle surface S_p est aussi exactement l'angle solide Ω de S vue depuis le point x . La projection de la surface S_p sur la base de l'hémisphère et donne la surface A . Le facteur de forme $F_{x,S}$ est alors le rapport de l'aire de A par l'aire de la base de l'hémisphère, c'est-à-dire π .

Bien que cette méthode ne soit applicable qu'à un élément différentiel de surface dS_1 , c'est aussi une bonne approximation dans le cas où les surfaces S_1 et S sont finies, avec la condition que S soit beaucoup plus grande que S_1 , ou que la distance les séparant soit grande. Dans ce cas, en utilisant l'angle solide Ω , le facteur de forme $F_{x,S}$ s'écrit :

$$F_{x,S} = \frac{A}{\pi} = \frac{\Omega \cos(\theta)}{\pi} \quad (\text{A.2-4})$$

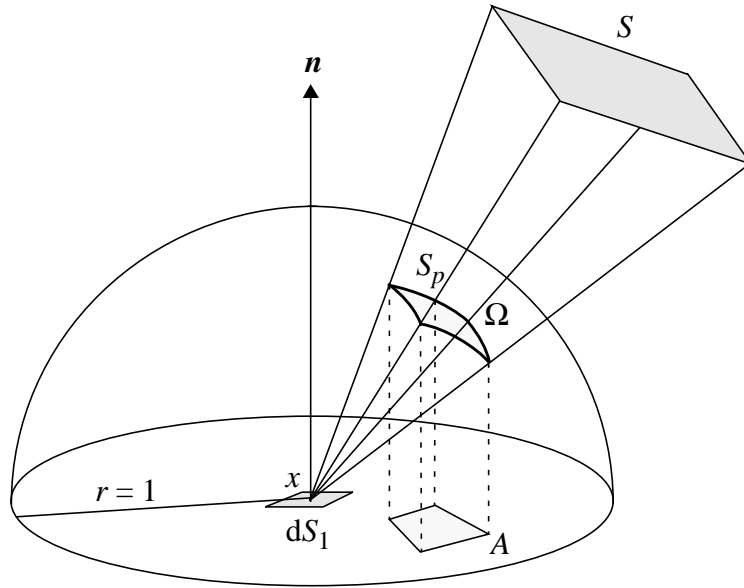


Figure A.2.3 Principe de l'«analogie de Nusselt».

En égalant les équations (A.2-3) et (A.2-4), la valeur de l'angle solide Ω est obtenue :

$$\Omega \cos(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \mathbf{n} \cdot \mathbf{G}_i \quad (\text{A.2-5})$$

où θ est l'angle entre la normale \mathbf{n} et le centre de la surface S .

Dans le cas du récepteur du goniophotomètre virtuel, les capteurs sont représentés par des quadrilatères ou des triangles (cas des capteurs qui se trouvent au sommet du récepteur). Les coordonnées des points P_i définissant ces polygones sont calculées en fonction des angles d'observation (θ_r, ϕ_r) :

$$P_i = \begin{cases} \sin(\theta_r) \cos(\phi_r) \\ \sin(\theta_r) \sin(\phi_r) \\ \cos(\theta_r) \end{cases}$$

L'angle θ de l'équation (A.2-5) est alors égal à l'angle d'observation θ_r .

La formule (A.2-5) est directement utilisée sous cette forme car dans le calcul du coefficient de luminance q , il apparaît au dénominateur le terme $\Omega \cos(\theta_r)$. Pour l'ensemble du récepteur, la somme des valeurs de $\Omega \cos(\theta_r)$ sur tous les capteurs est égale à π , qui est l'aire de la base de l'hémisphère.

A.3 Calcul du plan de référence

Le plan de référence des données $z(x_i, y_j)$ est défini comme le plan au sens des moindres carrés. L'équation générale de ce plan est $f(x, y) = a + bx + cy$ et le problème est de déterminer les expressions des coefficients a , b et c .

La somme χ^2 des carrés des écarts entre les données et le plan de référence est :

$$\begin{aligned}\chi^2 &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (z(x_i, y_j) - f(x_i, y_j))^2 \\ &= \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (z(x_i, y_j) - (a + bx_i + cy_j))^2\end{aligned}$$

où M et N sont les nombres de points d'échantillonnage suivant les directions Ox et Oy .

Le plan au sens des moindres carrés est le plan qui minimise la somme χ^2 . Mathématiquement, cette condition est obtenue en écrivant que les dérivées partielles de χ^2 par rapport aux coefficients a , b et c sont nulles :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \chi^2}{\partial a} &= -2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (z(x_i, y_j) - (a + bx_i + cy_j)) = 0 \\ \frac{\partial \chi^2}{\partial b} &= -2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i (z(x_i, y_j) - (a + bx_i + cy_j)) = 0 \\ \frac{\partial \chi^2}{\partial c} &= -2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_j (z(x_i, y_j) - (a + bx_i + cy_j)) = 0\end{aligned}$$

Ce système de 3 équations linéaires à 3 inconnues peut être facilement résolu. En définissant les moyennes \bar{x} , \bar{y} et \bar{z} par :

$$\bar{x} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad \bar{z} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N z(x_i, y_j)$$

Les solutions du système s'écrivent alors :

$$\begin{aligned}
 a &= \bar{z} - b\bar{x} - c\bar{y} \\
 b &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i(z(x_i, y_j) - \bar{z})}{M \sum_{i=1}^N x_i(x_i - \bar{x})} \\
 c &= \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_j(z(x_i, y_j) - \bar{z})}{N \sum_{j=1}^M y_j(y_j - \bar{y})}
 \end{aligned}$$

Bibliographie

- [AFE 85] Association Française de l'Eclairage (AFE), «La photométrie en éclairage», *Société d'Editions LUX*, 1985
- [AME 53] W.S. AMENT, «Toward a theory of reflection by a rough surface», *Proc. IRE*, No. 41, 1953, 142-146
- [BAR 91] R.BARIBEAU and M.RIOUX, «Influence of speckle on laser range finders», *Applied Optics*, Vol. 30, No. 20, Jul. 1991, 2873-2878
- [BEC 63] P. BECKMANN and A. SPIZZICHINO, «The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces», *Pergamon*, New York, 1963
- [BRO 66] R.A. BROCKELMAN, T. HAGFORS, «Note on the effect of shadowing on the backscattering of waves from random rough surface», *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. AP-14, No. 5, Sept. 1966
- [BUZ 92] M.BUZINSKI, A.LEVINE and W.H.STEVENSON, «Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation», *Proceedings of the IEEE 1992 National Aerospace and Electronics Conference*, NAECON 1992, May 1992, 1230-1236
- [CIE 86] Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), «Evaluation of the attribute of appearance called gloss», *CIE Journal TC 2-20*, Vol. 5, No. 2, 1986, 42-51
- [CIE 87] CIE, «Vocabulaire International de l'Eclairage», *CIE Publication*, No. 17.4, 1987
- [CIE 95] CIE, «Recommandations for the lighting of roads for motorized traffic», *CIE Publication 12.2*, 1977, mise à jour *CIE Publication 115*, 1995

- [CHU 91] E.L. CHURCH and P.Z. TAKACS, «Light Scattering from Non-Gaussian surfaces», *SPIE*, Vol. 2541, 1991
- [COO 84] R. COOK, T. PORTER and L. CARPENTER, «Distributed ray tracing», *Computer Graphics*, Vol. 18, No. 3, Jul. 1984, 137-145.
- [COQ 84] S. COQUILLART, «Représentation de paysages et tracé de rayons», Thèse de l'Ecole des Mines de St-Etienne, Institut national polytechnique de Grenoble, 1984
- [COU 96] J.-M. COULOMB, C. BRUSQUE, «Propriétés de réflexion des surfaces : le gonio-photomètre du LCPC - Performances et perspectives d'études», *Bull. de liaison du LCPC*, No. 204, Juillet-Août 1996, 25-35
- [DIP 85] M. DIPPE and E. WOLD, «Antialiasing through stochastic sampling», *Computer Graphics*, Vol. 19, No. 3, 1985, 69-78
- [EMB 94] J.J. EMBRECHTS, «Etude et modélisation de la réflexion lumineuse dans le cadre de l'éclairage prévisionnel», Thèse de l'Université de Liège, Belgique, 1994
- [GAR 84] N. GARCIA and E. STOLL, «Monte-Carlo calculation for electromagnetic wave scattering from rough surfaces», *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 52, No. 20, May 1984
- [GIN 98] B. van GINNEKEN, M. STAVRIDIS and J. KOENDERINK, «Diffuse and specular reflectance from rough surfaces», *Applied Optics*, Vol. 37, No. 1, Jan 1998
- [HE 93] D. HE, F.X. SILLION and all, «A comprehensive physical model for light reflection», *Computer Graphics*, Vol. 25, No. 4, Jul. 1993
- [JEB 82] G.M. JEBEN and H. MENDWIN, «On the failure of the Kirchhoff assumption in backscatter», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, 1982, 1607-1611
- [JEN 65] F.A. JENKINS and H.E. WHITE, «Fundamentals of optics», third edition, *Mc Graw-Hill*, New York, 1965
- [LI 98] X. LI, Z. WAN, «Comments on reciprocity in the directional reflectance modeling», *Progress of Natural Science*, Vol. 8, No. 3, 1998, 354-358.
- [LIN 95] N. LIN, H.P. LEE, S.P. LIM and K.S. LEE, «Wave scattering from fractal surfaces», *Journal of Modern Optics*, Vol. 42, No. 1, 1995
- [LUC 88] J. LUCAS, P.A. BEGOU, «Description de la macrotexture et de la microtexture», *Bull. de liaison du LCPC*, No. 185, Mai-Juin 1993
- [MAY 96] M. MAY, A.-M. CAZABAT, «Optique - Cours et problèmes résolus», *DUNOD*, Paris, 1995

- [MEN 97] A. MENDOZA-SUAREZ and E. MENDEZ, «Light scattering by a reentrat fractal surface», *Applied Optics*, Vol. 36, No. 15, May 1997
- [MIT 95] R. MITANCHEY, G. PERIOLE and M. FONTOYMONT, «Goniophotometric measurements: Numerical simulation for research and development applications», *Lighting Res. Technol.*, Vol. 27, No. 4, 1995
- [ODO 87] K.A. O'DONNELL and E.R. MENDEZ, «Experimental study of scattering from characterized random surfaces», *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 4, 1987, 1194-1205
- [OGI 91] J. A. OGILVY, «Theory of wave scattering from random rough surfaces», *Adam Hilger*, Bristol, 1991
- [ORE 95] M. OREN and S.K. NAYAR, «Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision», *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 14, 1995, 227-251
- [PER 98] B. PEROCHE et al., «Informatique graphique: méthodes et modèles», 2nd édition, collection informatique, *HERMES*, 1998
- [PRE 92] W. H. PRESS and al., «Numerical Recipes in C: the art of scientific computing», Second Edition, *Cambridge University Press*, 1992
- [SEV 96] R. SEVE, «Physique de la couleur», Collection physique fondamentale et appliquée, *MASSON*, 1996
- [SIL 94] F.X. SILLION, C. PUECH, «Radiosity and global illumination», Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, 1994
- [SMI 67] B.G. SMITH, «Geometrical shadowing of a random rough surface», *IEEE Trans. on Ant. and Prop.*, Vol. AP-15, No. 5, Sept. 1967
- [SOR 90] K. SØRENSEN, «A Model for the Specular Reflection of Road Surfaces», *Lys & Optik*, The Swedish Road & Traffic Research Institute, Jan. 1990
- [SOT 89] J.M. SOTO-CRESPO and M. NIETO-VESPERINAS, «Electromagnetic scattering from very rough random surfaces and deep reflection gratings», *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 6, 1989, 367-384
- [SOU 90] M. SOUCY, D. LAUTENDAU and all, «Behaviour of the center of gravity of a reflected gaussian laser spot near a surface reflectance discontinuity», *Industrial Metrology*, Vol. 1, No. 3, Sept. 1990, 261-274
- [STOUT] K. STOUT, «Development of Methods for Characterisation of Roughness in Three Dimensions», *Kogan Page LTD*, 199
- [THO 88] E.I. THORSOS, «The validity of the Kirchhoff approximation for rough surface scattering using a Gaussian roughness spectrum», *J. Ac. Soc. Am.*, Vol. 83, 1988

- [TOR 66] K.E. TORRANCE, E.M. SPARROW, «Off-specular peaks in the directional distribution of reflected thermal radiation», *J. Heat Transfer - Transaction of the ASME*, Vol. 88, May 1966, 223-230
- [TOR 67] K.E. TORRANCE, E.M. SPARROW, «Theory for off-specular reflection from roughed surfaces», *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 9, Sept. 1967, 1105-1114
- [TRA 94] P. TRAN, V.CELLI and A.A.MARADUDIN, «Electromagnetic scattering from a two-dimensional randomly rough, perfectly conducting surface: iterative methods», *J. Opt. Soc. Am A*, Vol. 11, No. 5, May. 1994, 1686-1689
- [TSA 94] L. TSANG, C.H. CHAN and K.PAK, «Backscattering enhancement of a two-dimensional, random rough surface (three-dimensional scattering) based on Monte Carlo simulations», *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 11, No. 2, Feb. 1994, 711-715
- [UET 92] Y. UETANI and K.MATSUURA, «A method of luminance calculation in an anisotropic diffuse reflecting interior», *Manuscript of the IESNA*, Annual Conference of San Diego, 1994
- [VOR 85] A.G. VORONOVICH, «Small slope approximation in wave scattering by rough surfaces», *Sov. Phys.-JETP*, No. 62, 1985, 65-70
- [VOR 94] A.G. VORONOVICH, «Wave Scattering from Rough Surfaces», Springer series on Wave Phenomena, *Springer-Verlag*, 1994
- [VOR 96] A.G. VORONOVICH, «Non-local small slope approximation for wave scattering from rough surfaces», *Waves in Random Media*, No. 6, 1996, 151-167
- [WAG 67] R.J. WAGNER, «Shadowing of Randomly Rough Surfaces», *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 41, No. 1, 1967
- [WAG 97] R.J. WAGNER, J.M. SONG and W.C. CHEW «Monte Carlo Simulation of Electromagnetic Scattering from two-Dimensional Random Rough Surfaces», *IEEE Antennas Propag.*, Vol. 45, No. 2, Feb 1997, 235-246

Index

A

- angle solide (calcul de l') 201
- approximation des petites pentes 50
- approximation du plan tangent
 - Voir modèle de l'approximation de Kirchhoff

B

- boîte englobante 82, 86
- BRDF
 - note page 90
 - Voir coefficient de luminance

C

- coefficient
 - de «masquage / ombrage» 67, 126–135, 177–185
 - de luminance 34, 49, 69, 77, 108, 113
 - moyen 39
 - réduit 38
 - de masquage 63, 119–125, 174–176
- continuité de la surface 88
- critère de Rayleigh 46, 59

D

- différence
 - de chemin optique 46
 - de phase 46

E

- écart-type des hauteurs 58, 59

- éclairage 84, 94

- énergétique 26, 78
- lumineux 30

- effets de «masquage / ombrage»
 - Voir coefficient de «masquage / ombrage»

- efficacité lumineuse relative spectrale de l'œil 28

F

- facette
 - décomposée en triangles 87, 160, 175
 - définie par une quadrique 87, 155
- facteur
 - de luminance 35
 - de réflexion 34, 111, 115
 - de spécularité 40
- flux
 - énergétique 26, 29, 69, 80
 - lumineux 29, 30
- fonction caractéristique 58
- fonction d'autocorrélation 198
- Fresnel
 - facteur de 31, 54, 70
 - relations de 31

G

- goniophotomètre
 - du LCPC 76
 - virtuel 78

I

indicatrice de diffusion 33
indice de réfraction 31, 70
intégrale de Helmholtz 49, 51–53
intensité
 cohérente 56, 58
 diffuse directionnelle 48
 diffuse uniforme 48
 énergétique 26
 incohérente 57, 59
 lumineuse 30
 lumineuse de diffusion 48

J

jittering 85

L

longueur de corrélation 58, 73, 198
lumière
 Voir région visible
luminance
 énergétique 27
 lumineuse ou visuelle 30

M

macrotexture 72
masquage 61
mésopique 28
méthode des petites perturbations 50
microtexture 72, 89–90
modèle de l'approximation de Kirchhoff
 50, 53–55

O

observateur de référence photométrique
 CIE 28
 Voir aussi $V(\lambda)$
ombrage 61

P

photopique 28
plan de référence

 au sens des moindres carrés 204
 calcul du 204
produit de convolution 199
puissance rayonnante
 Voir flux énergétique

R

rayon primaire 80, 84
réflexion
 diffuse 32, 112, 171
 multiple 48, 80, 91, 106–116, 170–173
 régulière
 Voir réflexion spéculaire
simple
 Voir réflexion multiple
 spéculaire 30, 48, 106, 170
région visible 27
rétrodiffusion 32, 111, 113, 136
rétro réflexion 32
rugosité 70

S

scotopique 28
Snell-Descartes
 lois de 30
source de lumière 76, 84
suivi des rayons 79, 81
surface
 à profil en triangle 119
 à profil gaussien 58, 123, 198
 à profil sinusoïdal 121
 aléatoire 198

T

tracé de rayons 79
tranche d'espace 82

V

$V(\lambda)$ 28, 77

Y

Yart 79

Title:

Study of Road Surface Photometric Properties by Numerical Simulations

Abstract:

The luminance coefficient, or the bi-directional reflectance distribution function (BRDF), of road pavement is the main parameter to estimate the quality of a street lighting installation. Today, this coefficient is well known for a particular geometry specified by the CIE. The aim of the present work is to extend this knowledge to all incident and reflected directions. A more comprehensive understanding of the correlation between the BRDF and the road pavement features is also searched.

The theoretical models of light reflection suit a large range of materials and surface finishes but their hypotheses are not verified for road pavement. An new approach based on numerical simulations and a «virtual reflectometer» has been developed. The use of ray-tracing techniques offers the capability of following the propagation of light rays and thus of taking into account complex phenomena such as multiple reflections and masking/shadowing effects. The studied sample is described by a regular 3D sampling of the heights. The photometric properties of the surface materials (aggregates and binders) are given by different models which involve hypotheses about the micro-roughness.

First, the validation of the virtual reflectometer was done with special surfaces characterized by synthetic profiles. The results brought new data which called certain hypotheses of the theoretical models into question. Then, samples of road pavement were used. But the number of measured samples was too small to allow general conclusions about the behaviour of the BRDF of such surfaces. However, this work shows that the BRDF is closely correlated to the road pavement texture. All these results show the many prospects of studies offered by the virtual reflectometer.

Discipline:

Physic, Metrology

Key Words:

CALCULATION, LUMINANCE COEFFICIENT, PHOTOMETRY, REFLECTION, ROAD SURFACE

Résumé :

L'étude des caractéristiques photométriques des revêtements de chaussée est primordiale dans le domaine de l'éclairage. L'évaluation du coefficient de luminance de ces surfaces est alors nécessaire pour dimensionner une installation d'éclairage. Pour l'instant, ce coefficient n'est connu que pour une géométrie particulière fixée par les recommandations de la CIE. Dans cette thèse, l'objectif est d'étendre cette géométrie à toutes les directions d'éclairage et d'observation et de rechercher l'influence sur ce coefficient de la texture des surfaces et des propriétés optiques de leurs matériaux.

À l'heure actuelle, les modèles théoriques de réflexion de la lumière ne sont pas adaptés aux surfaces rugueuses du type chaussée. Le choix s'est donc porté sur une simulation numérique et un «goniophotomètre virtuel» a été développé. La technique retenue est celle du tracé de rayons, car des phénomènes complexes à modéliser, comme les réflexions multiples et les effets de masquage/ombrage, sont ainsi directement pris en compte. La surface de l'échantillon étudié est représentée par un échantillonnage régulier 3D de son profil et ses constituants (granulats et liants) sont différenciés par leurs propriétés optiques liées en partie à la microrugosité de la surface.

Après avoir été validé dans des conditions particulières, le goniophotomètre virtuel est utilisé sur des surfaces synthétiques aléatoires. Cette approche apporte des données nouvelles qui remettent en cause certaines hypothèses de modèles théoriques. Dans une seconde partie, des échantillons de revêtements de chaussée sont analysés. Le faible nombre de profils mesurés ne permet pas de tirer des conclusions générales. Toutefois, il est démontré qu'il existe un lien fort entre la texture de ces revêtements et le comportement de la lumière réfléchie. L'ensemble de ces résultats met en avant les nombreuses perspectives d'études offertes par le goniophotomètre virtuel.

Discipline :

Physique, Métrologie

Mots-clés :

CALCUL, COEFFICIENT DE LUMINANCE, PHOTOMETRIE, REFLEXION, REVETEMENTS DE CHAUSSEE

Adresses de l'U.F.R. et du laboratoire d'accueil :

Conservatoire National des Arts et Métiers
Institut National de Métrologie
292, rue Saint-Martin
F-75141 PARIS Cedex 03

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
Division ESE
58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS Cedex 15